



**FILIPA DA COSTA
PINTO FONSECA**

**ESTRUTURA DO PLUTÃO DO GRANITO DO
CARAMULO: APLICAÇÃO DO MÉTODO ASM**



**FILIPA DA COSTA
PINTO FONSECA**

**ESTRUTURA DO PLUTÃO DO GRANITO DO
CARAMULO: APLICAÇÃO DO MÉTODO ASM**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Geomateriais e Recursos Geológicos, realizada sob a orientação científica da Professora Doutora Beatriz Valle Aguado, Professora Associada do Departamento de Geociências da Universidade de Aveiro e do Professor Doutor Jorge Manuel Pessoa Girão Medina, Professor Associado do Departamento de Geociências da Universidade de Aveiro.

Para os meus pais, Filipe e Margarida.

Para as minhas irmãs, Joana, Beatriz e Filipa.

o júri

Professor Doutor Fernando Ernesto de Almeida

Professor Associado, Departamento de Geociências da Universidade de Aveiro (Presidente)

Professora Doutor Helena Maria Sant'Ovaia Mendes da Silva

Professor Associada, Departamento de Geociências, Ambiente e Ordenamento do Território da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto (Arguente)

Professora Doutora Beatriz Valle Aguado

Professora Associada, GEOBIOTEC & Departamento de Geociências da Universidade de Aveiro (Orientador)

agradecimentos

Depois desta longa jornada, agradeço a todos aqueles que de alguma forma me ajudaram e contribuíram para a conclusão desta etapa importante da minha vida.

Um agradecimento muito especial à Professora Beatriz Aguado e ao Professor Jorge Medina pelo apoio prestado ao longo das fases da dissertação do mestrado em Geomateriais e Recursos Geológicos e pela transmissão de conhecimentos. Agradeço também ao Doutor Nuno Durães pela disponibilidade e apoio. Não poderia deixar de agradecer aos meus colegas de trabalho, Letícia Ferreira e Luís Portela, pelas saídas de campo e pelo apoio prestado ao longo do mestrado. Agradeço a ajuda da Sara Sousa que ajudou a realizar a primeira campanha de amostragem

Sinto-me igualmente agradecida à Doutora Helena Sant'Ovaia pela confiança e prontidão com que me facilitou o acesso a equipamento do Departamento de Geociências, Ambiente e Ordenamento do Território da FCUP assim como à Ana Marta Gonçalves por acompanhar e ajudar na realização do trabalho no Porto

Um agradecimento particular à Filipa Sousa por todo o apoio companheirismo, amizade e ensinamentos. Ao Luís Portela e Tânia Costa por marcarem positivamente esta jornada. Nunca esquecendo a grande amizade e acolhimento do Renato Castro, do Leonel Coutinho, da Mariana Bessa, da Ana Gandra e do Marco Teixeira. Por fim fica o agradecimento à Andreia Rebelo, Guilherme Lourenço, Francisco da Graça e Tiago Teixeira. Por fazerem parte desta etapa tão importante.

Por fim, sinto-me sinceramente agradecida pelo, constante e incansável apoio e paciência de toda a minha família, em particular dos meus pais, Filipe e Margarida e das minhas irmãs Beatriz, Joana e Filipa.

palavras-chave

Plutão do Caramulo, maciço granítico, ASM, estrutura, fracturação, Zona Centro-Ibérica.

resumo

Este trabalho teve como principal objectivo o estudo das rochas graníticas que afloram no denominado Plutão do Caramulo, sob o ponto de vista estrutural (fracturação) e de anisotropia de susceptibilidade magnética, de modo a contribuir para o conhecimento acerca do seu modelo de instalação.

O Plutonito do Caramulo situa-se na fronteira entre a Beira Litoral e a Beira Alta, na parte centro ocidental do território português, e está inserido na Zona Centro Ibérica. Este corresponde a uma importante intrusão varisca, sin- a tardi-D3, que intruiu os metassedimentos do Complexo Xisto-Grauváquico (CXG), pertencentes ao Grupo do Beiras, e de idade do Neoproterozóico / Câmbrio Inferior.

Um total de 117 amostras, distribuídas por 27 afloramentos, foram recolhidas e nas quais foram determinados os valores de susceptibilidade magnética (SM). Os valores de susceptibilidade magnética (Km) obtidos foram baixos, oscilando entre 2.0×10^{-5} e 9.0×10^{-5} SI. A anisotropia de susceptibilidade magnética foi quantificada através dos parâmetros anisotropia total (P%) e do parâmetro de forma (T). As secções mais anisotrópicas do plutão encontram-se na sua periferia, principalmente nas proximidades do contacto nordeste, o que sugere a presença de fácies mais biotíticas nestes sectores. Os valores de T indicam que a maioria dos granitos apresenta “fabric” planar com excessão do sector central e dos extremos NO e SE, onde o “fabric” é linear.

Face à correlação entre o elipsóide de SM e o “fabric” mineral, a baixa anisotropia e a fraca ou inexistente deformação no estado sólido do granito do Caramulo, a foliação e a lineação magnéticas devem corresponder, respectivamente, à foliação e lineação magmáticas. O padrão definido pela orientação da foliação sugere que o fluxo magmático ter-se-á processado paralelamente aos contactos com os metassedimentos encaixantes. Contudo, há também evidências que apontam para a influência da deformação regional aquando da instalação do magma granítico. Com efeito, a forma alongada do plutão e a direcção dominante da lineação, paralelas às estruturas variscas da D3, sugerem que o fluxo do magma também esteve controlado tectonicamente por esta fase de deformação.

A atitude dos planos de diaclases foram medidas em oito locais distribuídos pelo maciço granítico, tendo-se verificado a existência de duas famílias principais de diaclases com orientações NO-SE e NE-SO (subverticais) e uma terceira grande família com pendores sub-horizontais. O estudo das imagens aéreas permitiu identificar a fracturação geral predominante que não diferem muito do diaclasamento.

keywords

Caramulo pluton, Granitic massif, AMS, structure, fracturing, Central-Iberian Zone

abstract

The main goal of this work was the study of granitic rocks that outcrop in Caramulo Pluton, through the method of anisotropy of magnetic susceptibility and the structural aspect, in order to increase the knowledge of its installation model.

The Caramulo Massif lies in the border between Beira Alta and Beira Litoral, in the western part of the portuguese territory and it is part of the Central-Iberian Zone. The sector under study is an important sin- a tardi-D3 variscan intrusion, that intrudes the metasediments of Neoproterozoic / Lower Cambrian age (belonging to the Beiras Group of the Complexo Xisto-Grauváquico - CXG).

A total of 117 samples, distributed by 27 outcrops, were collected and the magnetic susceptibility (MS) values were determined one by one. These results were low and oscillated between 2.1×10^{-5} and 9.0×10^{-5} . The anisotropy of magnetic susceptibility was quantified through the total anisotropy (P%) parameter and the shape parameter (T). The sectors with the highest anisotropy are the borders of the massif, mostly in the north and eastern limit, which suggests that biotite is more present in those zones. The values of T indicate that the majority of the pluton presents planar fabric excluding the central sector and the NW and SE extremes, where the fabric is linear. Due to the correlation between the MS ellipse and the mineral fabric, the low anisotropy and the almost absent deformation of the granite in the solid state, the magnetic foliation and lineation must be the same as the magmatic ones. The pattern defined by the orientation of the foliation suggests that the magmatic flow, probably, had been processed alongside to the contacts with the metasediments. Although there is evidences that indicates that the regional deformation influenced the granite installation. The elongated shape of the massif and the main direction of the lineation, which are alongside to the D3 variscan structures, suggests that the flow must had been tectonically controlled by the third fase of deformation.

The orientation of the joints was measured in eight spots, the existence of two main joint families were verified with NW-SE and NE-SW directions and a third one, which is a major family of sub horizontal dip. The study of aerial images allowed to identify the main general fractures which have similar directions to the joints.

ÍNDICE

CAPÍTULO I: INTRODUÇÃO	01
I.1. Objetivos do trabalho.....	01
I.2. Metodologia do trabalho.....	01
I.3. Estrutura da dissertação.....	02
CAPÍTULO II: ENQUADRAMENTO GEOLÓGICO	05
II.1. Localização geográfica de área estudada.....	05
II.2. O Maciço Ibérico e a Zona Centro-Ibérica.....	06
II.2.1. A Zona Centro-Ibérica	07
II.3. Geologia da região do Caramulo.....	10
II.3.1. Os metassedimentos.....	10
II.3.2. O Plutão do Caramulo.....	13
CAPÍTULO III: ANISOTROPIA DE SUSCETIBILIDADE MAGNÉTICA: PRÍNCÍPIOS E METODOLOGIA	17
III.1. Introdução à técnica da ASM.....	17
III.1.1. Suscetibilidade magnética.....	17
III.1.2. Suscetibilidade magnética em rochas graníticas.....	18
III.1.3. Anisotropia de suscetibilidade magnética.....	20
III.2. Metodologia do trabalho.....	21
III.2.1. Trabalho de campo.....	21
III.2.2. Preparação das amostras.....	23
III.2.3. Medição da suscetibilidade magnética e da respetiva anisotropia.....	24
III.2.4. Tratamento dos dados e elaboração de mapas de síntese.....	25
CAPÍTULO IV: “FABRIC” MAGNÉTICO DO GRANITO DO CARAMULO	27
IV.1. Suscetibilidade magnética.....	27
IV.2. ASM: dados escalares.....	30
IV.3. Dados de orientação.....	31
IV.3.1 Variabilidade dos dados de orientação.....	32
IV.3.2. Foliação e lineação magnéticas.....	33
CAPÍTULO V: ESTUDO DA FRACTURAÇÃO	37
V.1. Observação de imagens aéreas.....	37

V.2. Medição da diaclases	40
V.2.1. Matadegas.....	42
V.2.2. Belazaima.....	42
V.2.3. S. João do Monte.....	43
V.2.4. Bezerreira.....	45
V.2.5. Pinoucas.....	45
V.2.6. Dornas.....	46
V.2.7. AMS-26.....	47
V.2.8. Cabeço da Neve.....	48
V.3. Interpretação.....	49
 CAPÍTULO VI: CONCLUSÕES	53
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	55

ANEXOS

Anexo 1.....	I
--------------	---

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO II: ENQUADRAMENTO GEOLÓGICO

<i>Figura II.1: Localização da Serra do Caramulo na zona centro-norte de Portugal.....</i>	5
<i>Figura II.2: Zonas geotectónicas no Maciço Ibérico com a localização da região do Caramulo. Extraído de Martinez Catalán (2012)</i>	6
<i>Figura II.3: Evolução estrutural da Zona Centro-Ibérica durante o Ciclo Varisco (modificado de Dias e Ribeiro 1995)</i>	8
<i>Figura II.4: Vergência das obras de primeira e terceira fases de deformação na ZCI. Extraído de Dias et al. (2013)</i>	8
<i>Figura II.5: Distribuição dos granitoides variscos sin-D₃ e tardi-pós-D₃ no Centro e Norte de Portugal com a localização aproximada da região do Caramulo (adaptado de Ribeiro et al., 1972, extraído de Azevedo e Valle Aguado, 2013)</i>	9
<i>Figura II.6: Geologia da região do Caramulo segundo Ávila Martins (1962) (mapa redesenhado e adaptado)</i>	11
<i>Figura II.7: Zonas metamórficas nos metassedimentos da região do Caramulo segundo Godinho (1974, 1980).</i>	12
<i>Figura II.8: Cartografia do plutão do Caramulo segundo Godinho (1980). A: Almijofa, J: Jueus, MA: Macieira de Alcôba, P: Paredes, SJM: São João do Monte, V: Varzielas.....</i>	14

Figura II.9: Aspeto macroscópico dos granitos que constituem o plutão. A: Fácies do Caramulo (local de amostragem CRLM-13). B: “Schlieren” biotítico no granito de Paredes (local de amostragem (CRLM-15). C: Granito de Almijofa (local de amostragem CRLM-17). D: Granito de Macieira de Alcôba (local de amostragem (CRLM-18)	15
----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

CAPÍTULO III: ANISOTROPA DE SUSCEPTIBILIDADE MAGNÉTICA: PRÍNCÍPIOS E METODOLOGIA

Figura III.1: Esquema com a orientação dos eixos do elipsoide de suscetibilidade magnética relativamente ao referencial geográfico de uma amostra (extraído de Bouchez,2000)	18
Figura III.2: Formas de magnetização. Os diagramas da esquerda de cada par de figuras mostram a magnetização adquirida (seta branca) por um material aquando a aplicação de um campo magnético externo (seta preta). Os esquemas da direita ilustram a magnetização que permanece após a retirada do campo magnético. (a) e (b) Materiais diamagnéticos e paramagnéticos, respetivamente. (c), (d) e (e) Três tipos de materiais ferromagnéticos (extraído de Dubey, 2014)	19
Figura III.3: Suscetibilidades magnéticas em granitos paramagnéticos do Plutão de Mont-Luis-Andorra (Pirenéus) e ferromagnéticos do batólito da Serra Nevada (Califórnia). Extraído de Bouchez, 1999	20
Figura III.4: Formas dos elipsoides ASM conforme o valor do parâmetro T (modificado de Gomes e Sant’Ovaia, 2015)	21
Figura III.5: Mapa de amostragem	22
Figura III.6: Equipamento usado na amostragem. A: Sonda portátil com bomba de água acoplada para arrefecimento e lubrificação, caixa com bússola e amostrador incorporado. B: Aspeto da bússola com o tubo amostrador. C: orientação da amostra antes de ser retirada do afloramento.....	23
Figura III.7: A: Amostra cilíndrica colhida no campo com a sua referência e marcas de orientação. B: Máquina de corte, modelo Baldor.Reliancer industrial motor VL3501-50, do Departamento de Geociências, Ambiente e Ordenamento do Território da FCUP. C: Subamostras obtidas após o corte com novas marcas de orientação.....	24
Figura III.8: A: Acessório em plástico usado na marcação das subamostras. B:Desenho das linhas de referência no topo da sub-amostra. C: Subamostra com todas as marcas necessárias para a sua colocação no susceptibilímetro.....	24
Figura III.9: A: Susceptibilímetro Kappabridge KLY-4S.A instalado num dos laboratórios do DGAOT da FCUP. B, C e D: as três posições em que a subamostra é colocada no porta-amostras do susceptibilímetro.....	25
Figura III.10: Dados relativos à estação CRML-22 no programa ANISOFT4.2.).....	26

CAPÍTULO IV: “FABRIC” MAGNÉTICO DO GRANITO DO CARAMULO

Figura IV.1: Histogramas de frequência do valor da suscetibilidade magnética das rochas do granito do Caramulo. O primeiro gráfico mostra a variação de Km no conjunto das amostras e o segundo ilustra as diferenças/semelhanças de suscetibilidade entre as fácies cartografadas no plutão.....	28
Figura IV.2: A: Valores da suscetibilidade magnética (Km). Os pontos indicam os locais de amostragem e os contactos internos referem-se aos limites entre as fácies graníticas individualizadas por Godinho (1980). B: Mapa de isovalores com a percentagem modal de biotite (os pontos indicam os pontos de amostragem de Godinho, 1980). A, Almijofa;	

J: Jueus; MA: Macieira de Alcôba; P, Paredes. SJM: São João do Monte, V: Varzielas.....	29
Figura IV.3: Distribuição dos valores anisotropia total P% no plutão do Caramulo. Do lado direito, diagrama P% versus suscetibilidade magnética (Km).....	30
Figura IV.4: A: Mapa de isovalores do parâmetro de forma T. B: Diagrama T versus grau de anisotropia (P %). C: Diagrama T versus suscetibilidade média (Km).....	31
Figura IV.5: (A): Projeção dos ângulos de confiança máximos dos eixos K1 e K3. (B): Diagrama onde se relacionam os ângulos de confiança de K1 e K3 com o grau de anisotropia (P %).....	32
Figura IV.6. Projeções estereográficas e formas dos elipsoides de ASM correspondentes a formas oblatas (a), prolatas (b) e a elipsoides intermédios (c). Adaptado de Borradaile e Henry, 1997)	33
Figura IV.7. (A) Orientações da foliação magnéticas e projeção estereográfica igual-área dos polos da foliação. (B): Orientações da lineação magnéticas e projeção estereográfica igual-área das lineações magnéticas.....	34

CAPÍTULO V: ESTUDO DA FRACTURAÇÃO

Figura V.1: Imagem aérea captada do GoogleEarth (datada de 10/12/2018), na qual se pode observar a fracturação geral existente no plutão do Caramulo.....	38
Figura V.2: Fracturação geral marcada sobre imagens aéreas obtidas no ArcGlobe. Verificar que as orientações predominantes são NE-SO, ENE-OSO e NNO-SSE.....	39
Figura V.3: Localização dos oito locais onde foram medidas as atitudes das diaclases...	41
Figura V.4: Diagrama de contornos com indicação das famílias de diaclases (a). Diagrama de rosas destacando as orientações principais das diaclases presentes em Matadegas (b).....	42
Figura V.5: Aspeto do afloramento onde foram medidas as atitudes dos planos de diaclases no local Belazaima.....	43
Figura V.6: Diagrama de contornos com indicação das famílias de diaclases (a). Diagrama de rosas destacando as orientações principais das diaclases presentes em Belazaima (b).....	43
Figura V.7: Diagrama de contornos com indicação das famílias de diaclases (a). Diagrama de rosas destacando as orientações principais das diaclases presentes em S.J.Monte (b).....	44
Figura V.8: Imagem aérea do afloramento onde foram medidas as diaclases do local S. João do Monte, onde se traçaram algumas como exemplo.....	44
Figura V.9: Diagrama de contornos com indicação das famílias de diaclases (a). Diagrama de rosas destacando as orientações principais das diaclases presentes em Bezerreira (b).....	45
Figura V.10: Diagrama de contornos com indicação das famílias de diaclases (a). Diagrama de rosas destacando as orientações principais das diaclases presentes em Pinoucas (b).....	46
Figura V.11: Diagrama de contornos com indicação das famílias de diaclases (a). Diagrama de rosas destacando as orientações principais das diaclases presentes em Dornas (b).....	46
Figura V.12: Imagem aérea do afloramento onde foram medidas as diaclases do local Dornas, onde se traçaram algumas como exemplo.....	47
Figura V.13: Diagrama de contornos com indicação das famílias de diaclases (a).	

<i>Diagrama de rosas destacando as orientações principais das diaclases presentes em AMS-26 (b).....</i>	47
<i>Figura V.14: Histogramas com a frequência da direção (aqui representado com o valor do azimute) respeitante ao local AMS-26)</i>	48
<i>Figura V.15: Diagrama de contornos com indicação das famílias de diaclases (a). Diagrama de rosas destacando as orientações principais das diaclases presentes em Cabeço da Neve (b).....</i>	49
<i>Figura V.16. Imagem aérea do afloramento onde foram medidas as diaclases do local Cabeço da Neve, onde se traçaram algumas como exemplo.....</i>	49
<i>Figura V.17. Diagrama de contornos de todos os planos de diaclase medidos (a). Diagrama de rosas de todas as diaclases com pendores iguais ou superior a 70° (b).....</i>	50
<i>Figura V.18. Mapa do plutão do Caramulo com a fracturação e diagramas de rosas referentes a cada um dos locais onde foi medida a atitude das diaclases existentes.....</i>	51

ÍNDICE DE TABELAS

CAPÍTULO II: ENQUADRAMENTO GEOLÓGICO_____

<i>Tabela II.1: Classificação estrutural e geocronológica dos granitoides ibéricos (adaptado de Ferreira et al., 1987, extraído de Azevedo e Valle Aguado, 2013.....</i>	10
--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

CAPÍTULO IV: “FABRIC” MAGNÉTICO DO GRANITO DO CARAMULO_____

<i>Tabela IV.1. Resultados das medições de ASM das rochas graníticas do plutão do Caramulo. Km: suscetibilidade média, P: parâmetro de anisotropia total, T: parâmetro de forma (Jelinek, 1981), azimute e inclinação da suscetibilidade máxima (K1) e mínima K3), α_{min}, α_{max}: ângulos de confiança mínimo e máximo, respetivamente.....</i>	35
----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

CAPÍTULO V: ESTUDO DA FRACTURAÇÃO_____

<i>Tabela V.1: Coordenadas cartográficas no Sistema UTM Datum WGS84 dos oito locais onde foram medidas as atitudes das diaclases com informação da fácies do granito do Plutão segundo Godinho, 1980.....</i>	40
---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

Esta dissertação tem como título *O “fabric” magnético do Plutão do Caramulo (Zona Centro-Ibérica)* e destina-se à obtenção do grau de mestre em Geomateriais e Recursos Geológicos (2º Ciclo de Estudos) conferido pelas Universidades de Aveiro e do Porto.

Com este trabalho pretende-se contribuir para o conhecimento das rochas graníticas que afloram na ZCI através do estudo estrutural de um dos plutões que ocorrem na região centro de Portugal, usando métodos de campo tradicionais e a técnica da anisotropia da suscetibilidade magnética.

I.1. Objetivos do trabalho

Para a realização deste trabalho definiram-se os seguintes objetivos principais:

- Adquirir maior experiência nos trabalhos de campo e laboratorial para aquisição de dados geológicos.
- Fazer o reconhecimento geológico da região do Caramulo com base na cartografia existente.
- Colher amostras orientadas para posterior análise da suscetibilidade magnética e da sua anisotropia.
- Obter dados relativos ao diaclasamento do maciço granítico.
- Analisar e interpretar os dados obtidos e propor um mecanismo de instalação do magma granítico.

I.2. Metodologia do trabalho

A fim de concretizar os objetivos definidos no ponto anterior, foi estipulada uma metodologia de trabalho constituída pelas seguintes etapas:

- Levantamento bibliográfico sobre a Zona Centro Ibérica, com especial ênfase nos textos e cartografia geológica relativos à região do Caramulo.
- Elaboração de mapas de base, em ambiente ArcGIS, para utilização em gabinete e durante as campanhas de campo.
- Trabalho de campo, envolvendo: (a) reconhecimento geológico das diferentes unidades litológicas, (b) aquisição de dados macroscópicos sobre as diferentes fácies do Plutão do Caramulo, (c) recolha de amostras orientadas, (d) medição da orientação das diaclases do maciço granítico para posterior análise estatística e (d) registo fotográfico.
- Preparação das amostras para medição de suscetibilidade magnética, incluindo o corte e medição do respetivo volume.
- Medição da suscetibilidade magnética e obtenção dos dados de ASM. Para o efeito foi usado o susceptílimetro, *Kappabridge KLY-4S*, do Departamento de Geociências e Ordenamento do Território da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto.
- Análise de imagens de satélite para o estudo da fracturação, à escala regional, do Plutão do Caramulo.
- Compilação, construção de gráficos, tratamento e análise dos dados com recurso à utilização de diversos programas informáticos (*EXCEL*, *ANISOFT4.2*, *Stereo 32*) e realização de mapas de síntese, georreferenciados, com o *software* ArcGIS 10.3.
- Redação da dissertação.

I.3. Estrutura da dissertação

Além do capítulo introdutório, das referências bibliográficas e um anexo o presente relatório inclui mais cinco capítulos, organizados da seguinte forma:

- CAPÍTULO II: Enquadramento Geológico, que descreve resumidamente a geologia do sector centro-norte de Portugal, incluindo as suas características litoestratigráficas, metamórficas e magmáticas. Inclui também uma descrição mais detalhada dos granitos e metassedimentos da região do Caramulo.
- CAPÍTULO III: Anisotropia da Suscetibilidade Magnética: princípios e metodologia, onde se apresentam os fundamentos em que se baseia a técnica da anisotropia de suscetibilidade magnética (ASM) e são descritas, passo a passo, as diferentes etapas do trabalho de obtenção e tratamento deste tipo de dados.

- CAPÍTULO IV: “Fabric” magnético do granito do Caramulo. Neste capítulo mostram-se e discutem-se os resultados do estudo estrutural levado a cabo no plutão do Caramulo com a técnica da ASM.
- CAPÍTULO V: Estudo da fracturação do granito do Caramulo, onde se descrevem os afloramentos estudados, a metodologia seguida para a obtenção de dados, quer no campo quer no gabinete, e os resultados obtidos.
- CAPÍTULO VI: Conclusões, onde se sumarizam as principais conclusões da investigação realizada.

CAPÍTULO II

ENQUADRAMENTO GEOLÓGICO

A ascensão e instalação do granito do Caramulo fazem parte do conjunto de processos tectono-magmáticos que tiveram lugar no Maciço Ibérico no final do Paleozóico, durante as fases finais da Orogenia Varisca. Torna-se por isso conveniente enquadrar a região no contexto do soco varisco do centro-norte de Portugal, apresentando-se neste capítulo as principais características do sector e, com mais detalhe, a geologia das rochas graníticas e metamórficas da zona do Caramulo.

II.1. Localização geográfica da área estudada

A Serra do Caramulo situa-se na fronteira entre a Beira Litoral e a Beira Alta, na zona centro de Portugal. Estende-se desde o Vale de Besteiros e a bacia de Mortágua, que ocupam o sector sudeste, até à bacia hidrográfica do rio Vouga que limita a região a norte e a oeste. A região estudada está abrangida pelas folhas nº 187 e nº198 da Carta Militar de Portugal, na escala 1:25000, editadas pelos serviços Cartográficos do Exército.

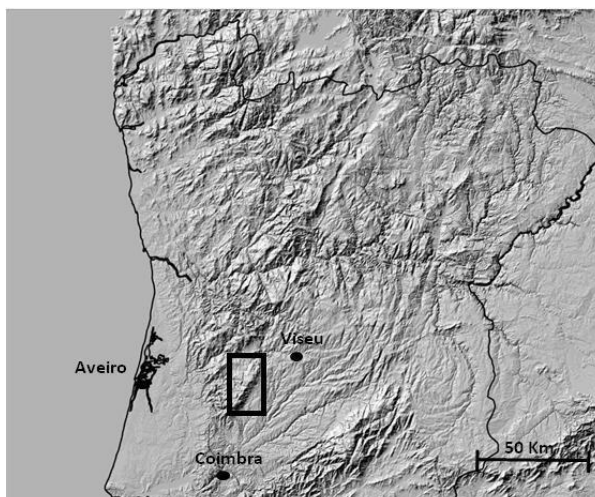


Figura II.1. Localização da Serra do Caramulo na zona centro-norte de Portugal.

II.2. O Maciço Ibérico e a Zona Centro-Ibérica

As rochas metamórficas e graníticas que afloram na região do Caramulo são o resultado dum conjunto de processos geológicos que acompanharam a formação duma cadeia de montanhas durante o Paleozóico Superior: a Cadeia Varisca (ou Cadeia Hercínica). O levantamento da cadeia montanhosa esteve diretamente relacionado com a colisão continental que deu origem ao supercontinente Pangeia. Na distribuição atual dos continentes, os afloramentos da Cadeia Varisca europeia encontram-se dispersos, em maciços separados entre si por áreas de sedimentos meso-cenozóicos ou pelas atuais áreas oceânicas. De todos os fragmentos variscos da Europa, o Maciço Ibérico é o mais extenso e o que proporciona um corte transversal mais contínuo e completo da Cadeia Varisca (Ribeiro *et al.* 1979).

O Maciço Ibérico é subdividido em vários domínios tectono-estratigráficos (e.g. Julivert *et al.*, 1974; Ribeiro *et al.*, 1979; Pérez Estaún *et al.*, 2004) (Fig. II.2). Nas zonas internas do Maciço (Astúrico-Occidental Leonesa, Galiza Trás-os-Montes, Centro-Ibérica e Ossa-Morena), predominam as sequências do Pré-câmbrico e do Paleozoico Inferior, afetadas por metamorfismo regional e deformação varisca intensos, e o plutonismo sin-orogénico encontra-se muito bem representado. Em contraste, nas zonas externas (Cantábrica e Sul-Portuguesa) as formações do Paleozóico Superior estão bem representadas, o metamorfismo regional é de baixo grau e o plutonismo granítico está praticamente ausente.

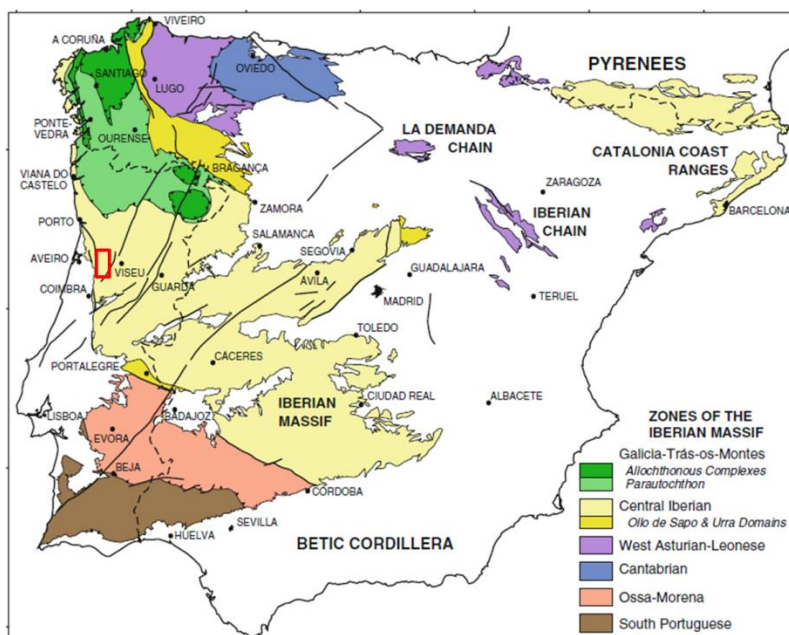


Figura II.2. Zonas geotectónicas no Maciço Ibérico com a localização aproximada da região do Caramulo. Extraído de Martínez Catalán (2012).

Considerado no seu conjunto, no segmento ibérico da cordilheira varisca identificam-se dois domínios com vergências opostas relativamente a uma zona axial situada na Zona Centro-Ibérica. O ramo norte, com vergência para NE, inclui as zonas Cantábrica, Astúrico-Occidental-Leonesa e a parte setentrional da Zona Centro-Ibérica, enquanto o ramo sul, com vergência para SO, compreende a parte meridional da Zona Centro-Ibérica e as zonas de Ossa-Morena e Sul-Portuguesa (Ribeiro *et al.*, 1979; Díez Balda *et al.*, 1990; Dias *et al.*, 2013). A região do Caramulo localiza-se na Zona Centro-Ibérica, em particular, no sector das dobras com vergência para SO.

II.2.1. A Zona Centro-Ibérica

A Zona Centro-Ibérica (ZCI) ocupa a parte central do Maciço Ibérico. É limitada a oeste pela zona de cisalhamento Porto-Tomar, com orientação NS a NNO-SSE, e a sul pela zona de cisalhamento de Tomar-Badajoz-Córdoba, com direção ONO-ESSE.

Uma das características mais significativas da ZCI é o predomínio das sequências ante-ordovícicas, pertencentes ao Complexo-Xisto-Grauváquico (CXG), relativamente às restantes formações Paleozóicas. A idade do CXG não é conhecida com exatidão, devido à ausência generalizada de macrofósseis. Contudo, de acordo com dados estratigráficos e com a informação fornecida através de icnofósseis e das idades U-Pb em zircões detríticos, admite-se que as unidades mais antigas do CXG possam corresponder ao Proterozóico Superior e as mais recentes ao Câmbrio Inferior (Bernardo de Sousa, 1984, 1985; Díez Balda *et al.*, 1990; Rodríguez Alonso *et al.*, 2004). Do ponto de vista estratigráfico, a ZCI caracteriza-se também pela ausência de sequências bem datadas do Câmbrio Médio e Superior e, ainda, pela presença de um Ordovício Inferior que assenta em discordância sobre os terrenos ante-ordovícicos e que, em toda a ZCI, tem um carácter transgressivo (Julivert *et al.*, 1974; Ribeiro *et al.*, 1979).

A estruturação da ZCI resultou essencialmente da deformação associada à Orogenia Varisca, estando fracamente representadas as estruturas relacionadas com episódios de deformação mais antigos (Díez Balda *et al.*, 1990). A deformação varisca teve lugar no final do Paleozóico, ao longo de três fases principais de deformação dúctil, designadas por D₁, D₂ e D₃ (Fig. II.3).

A primeira fase de deformação (D₁) afetou toda a sequência sedimentar pré-carbonífera e as suas estruturas encontram-se bem representados em toda a ZCI. Foi responsável pela formação de dobras e xistosidade de plano axial associada (S₁), com direção geral NO-SE. A vergência das dobras varia, dependendo do sector da ZCI em que se encontram (Fig. II.4).

As estruturas devidas às 2ª e 3ª fases de deformação (D₂ e D₃) apresentam uma distribuição mais heterogénea e ocorrem em domínios relativamente estreitos associados a acidentes tectónicos onde se concentra a deformação. Em particular, durante a D₃ desenvolvem-se zonas de cisalhamento dúctil verticais, onde são geradas dobras de plano axial vertical, por vezes com xistosidade associada (S₃), que redobram as estruturas anteriores (e.g. Díez Balda *et al.*, 1990, Escuder Viruete *et al.*, 1994, 1998; Dallmeyer *et al.*, 1997; Martínez Catalán *et al.*, 2004; Valle Aguado *et al.*, 2005).

Finalmente, durante os últimos estádios da orogenia desenvolveram-se fraturas segundo dois sistemas conjugados: um sistema direito com direção NNO-SSE a NO-SE e um sistema esquerdo, mais desenvolvido, com direção NNE-SSO a ENE-OSO (e.g. Arthaud e Matte, 1975; Ribeiro *et al.*, 1979; Marques *et al.*, 2002).

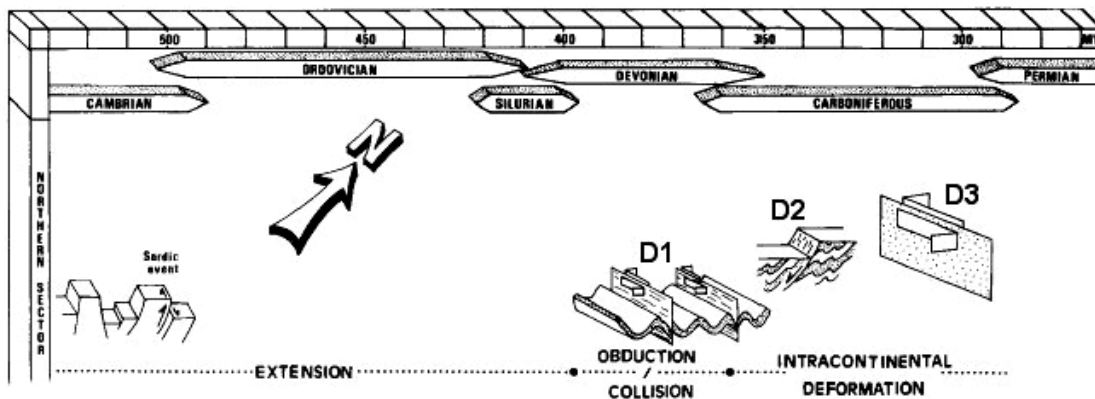


Figura II.3. Evolução estrutural da Zona Centro-Ibérica durante o Ciclo Varisco (modificado de Dias e Ribeiro, 1995).

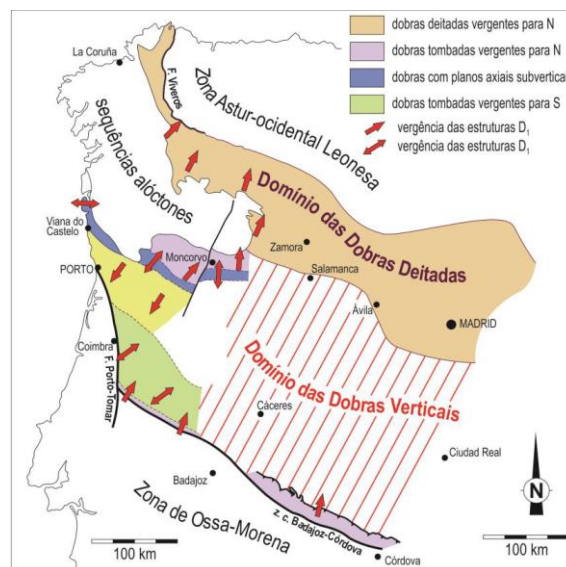


Figura II.4. Vergência das dobras de primeira e de terceira fases de deformação na ZCI. Extraído de Dias *et al.* (2013).

A intensidade do metamorfismo regional que afetou as sequências pre-carboníferas é muito variável, embora predominem as rochas de baixo grau metamórfico (Julivert *et al.*, 1974). Contudo, nos sectores mais internos da ZCI, os antiformes de 3ª fase coincidem, em geral, com áreas de alto grau metamórfico, onde podem ser atingidas as condições da anatexia. Estas áreas formam faixas NO-SE e apresentam uma distribuição mais ou menos simétrica das isógradas em torno de um eixo térmico, marcado com frequência pela presença de granitos variscos de duas micas (Oen, 1970; Martínez *et al.*, 1988).

A atividade magmática relacionada com a Orogenia Varisca está representada através de numerosas e extensas áreas de rochas graníticas (Fig. II.5). A intrusão da maioria dos corpos graníticos ocorreu tardiamente na evolução tectónica do sector. Com efeito, é posterior ao metamorfismo regional e está geralmente associada no tempo com a terceira fase de deformação (D₃). Tendo em conta as relações temporais com esta fase, Ferreira *et al.*, (1987) distinguiram duas categorias principais de granitóides (Tabela II.1):

- granitoides sincinemáticos (granitóides sin-D₃). Este grupo compreende a maior parte dos granitos peraluminosos de duas micas e, embora com menor representação, alguns corpos de granodioritos e granitos biotíticos.
- granitoides tardi-cinemáticos a pós-cinemáticos (granitoides tardi- a pós-D₃), cuja intrusão teve lugar no final da 3ª fase ou após este evento de deformação. Esta categoria está constituída, predominantemente, por intrusões da série dos granodioritos e granitos biotíticos.

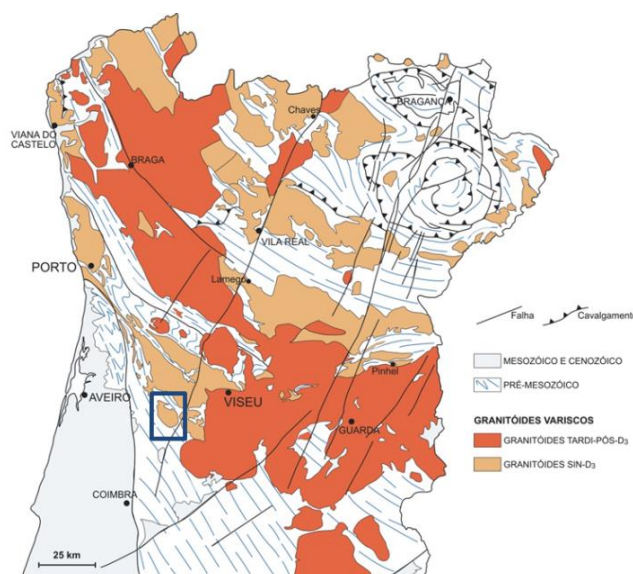


Figura II.5. Distribuição dos granitoides variscos sin-D₃ e tardi-pós-D₃ no Centro e Norte de Portugal com a localização aproximada da região do Caramulo (adaptado de Ribeiro *et al.*, 1972, extraído de Azevedo e Valle Aguado, 2013).

Tabela II.1. Classificação estrutural e geocronológica dos granitoides ibéricos (adaptado de Ferreira *et al.*, 1987, extraído de Azevedo e Valle Aguado, 2013).

GRANITÓIDES VARISCOS			
Classificação		Fácies mais comuns	Idades U-Pb
Granitóides Tardi-pós-D₃	“Younger”	<ul style="list-style-type: none"> - granitos biotíticos, biotítico-moscovíticos e de duas micas, por vezes porfiróides - granitos essencialmente biotíticos, frequentemente porfiróides - gabros, dioritos, monzodioritos quartzicos, granodioritos 	310-290 Ma
Granitóides Sin-D₃	“Older”	<ul style="list-style-type: none"> - leucogranitos e granitos de duas micas, com deformação variável - granodioritos e granitos biotíticos, com deformação variável 	320-310 Ma
GRANITÓIDES ANTE-VARISCOS			
Granitóides Ante-variscos	“Oldest”	- granitóides do Proterozóico superior ao Paleozóico inferior (ortognaisses)	

II.3. Geologia da região do Caramulo

O plutão do Caramulo localiza-se no sector ocidental da ZCI, em particular, no domínio das dobras vergentes para SO. Do ponto de vista da geologia local, a região do Caramulo está composta por metapelitos e metagrauvaques do Complexo Xisto-Grauváquico ante-Ordovício, quartzitos e metapelitos de idade ordovícica e granitóides sin-D₃ (Fig. II.6). Ocorrem também numerosos filões de quartzo que nos metassedimentos se dispõem segundo as estruturas variscas (NO-SE) enquanto nos corpos de granitos seguem a orientação da fracturação regional tardi-varisca (NE-SO).

II.3.1. Os metassedimentos

As sequências do Proterozoico Superior – Câmbrio Inferior pertencentes ao Complexo Xisto-Grauváquico (CXG) encontram-se amplamente representadas na região. Para além dos metapelitos e metagrauvaques que predominam nesta unidade, são numerosas as intercalações de metaconglomerados em camadas de forma lenticular que afloram a NE do plutão do Caramulo (Fig. II.6). Também no mesmo sector afloram rochas quartzíticas que transitam para o topo a xistos negros. Estas litologias desenham no mapa uma estrutura em sinclinal (sinclinal de Urgueira) e foram

consideradas por Ávila Martins (1962) como fazendo parte do CXG. Contudo, na cartografia mais recente, na edição de 1992 da Carta Geológica de Portugal, na escala 1:500000, é atribuída uma idade ordovícica a estas formações.

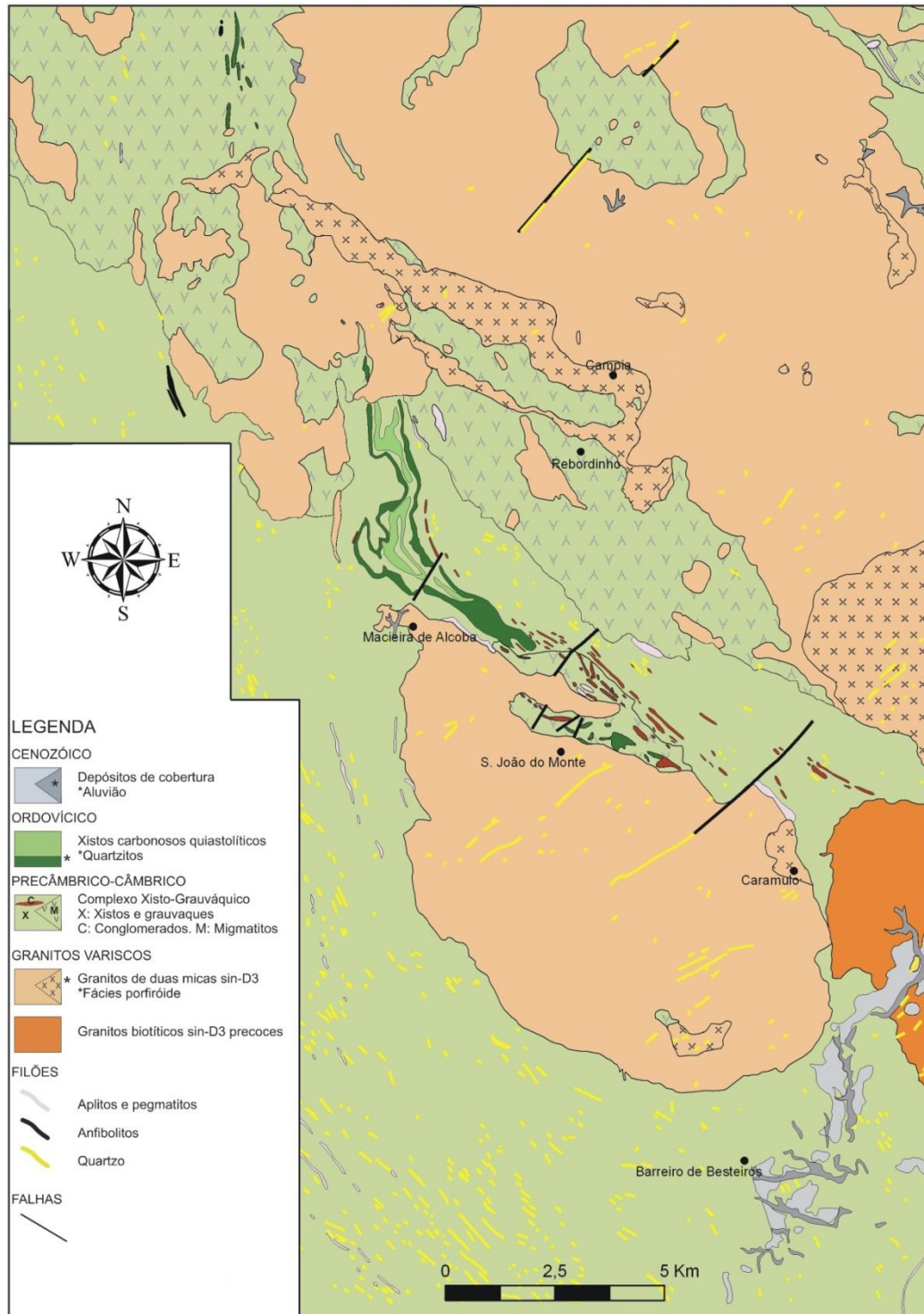


Figura II.6. Geologia da região do Caramulo segundo Ávila Martins (1962) (mapa redesenhado e adaptado).

O metamorfismo regional que afetou a região foi estudado por Godinho (1974). Este autor mostrou que o grau metamórfico aumenta de SO para NE e individualizou as zonas da clorite, biotite, andaluzite+estauroлите e silimanite+moscovite (Fig. II.7). O estudo petrográfico levado a cabo por Godinho permitiu-lhe definir um gradiente metamórfico de 50°C/km, aproximadamente, que possibilitaria atingir as condições de anatexia a profundidades de uns 12-15 km de profundidade (Godinho, 1974, 1980).

A estreita relação espacial da zonalidade metamórfica com os granitos de duas micas que ocupam o núcleo do antiforme de Porto-Tondela, situados a NE do plutão do Caramulo, levou a que o metamorfismo regional deste sector fosse considerado por Godinho como um exemplo de *plutonometamorfismo*, designação dada ao modelo proposto por Oen (1970) para explicar o metamorfismo regional varisco na ZCI.

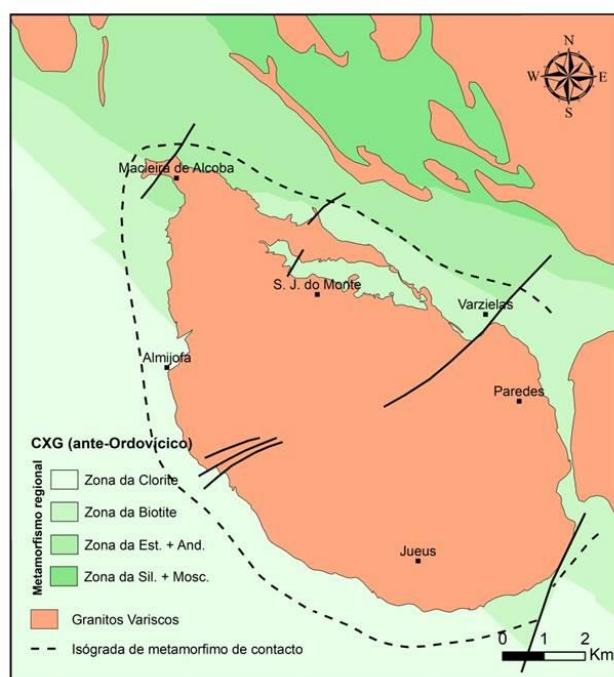


Figura II.7. Zonas metamórficas nos metassedimentos da região do Caramulo segundo Godinho (1974, 1980).

As estruturas da primeira fase estão representadas na área através do sinclinal de Urgueira, uma estrutura complexa desenhada nos mapas pelos níveis quartzíticos do Ordovícico (Fig. II.6), e pela presença da xistosidade S_1 em todos os metassedimentos (Medina, 1996). Localmente, nos domínios epizonais e com carácter algo mais generalizado nas rochas de grau médio/alto observa-se uma crenulação da S_1 que pode dar origem ao desenvolvimento de uma nova xistosidade subvertical, possivelmente relacionada com a D_3 (Medina, 1996).

II.3.2. O Plutão do Caramulo

O Plutão do Caramulo é um maciço granítico circunscrito e forma aproximadamente elíptica, com cerca de 65 km². O eixo maior da massa granítica orienta-se segundo a direção NO-SE e tem cerca de 15 km de comprimento. Trata-se de um granito moscovítico-biotítico considerado sintectónico com a 3ª fase de deformação varisca (D₃) (Tassinari, *et al.*, 1996). É intrusivo nos metassedimentos ante-ordovícicos do Complexo Xisto-Grauváquico (CXG), corta as isógradas do metamorfismo regional e provoca nas formações adjacentes um metamorfismo de contacto que se sobrepõe ao regional prévio (Fig. II.7).

As rochas graníticas que constituem o plutão foram alvo dos trabalhos efetuados por M. M. Godinho durante o seu doutoramento, concluído na Universidade de Coimbra em 1980. Este autor apresentou um novo mapa, contendo algumas diferenças relativamente à cartografia do plutão de Ávila Martins publicado nos anos 60 (comparar as figuras II.6 e II.8). Com efeito, para além das numerosas fraturas que cortam transversalmente o maciço, Godinho individualiza quatro fácies diferentes, evidenciando uma zonalidade concêntrica do plutão: granito de Macieira de Alcôba, granito de Almijofa, granito do Caramulo e granito de Paredes (Fig. II.8). Os contactos entre eles são transicionais e ocorrem dentro de zonas estreitas com larguras variando entre poucos metros e uma centena de metros.

Em todas a fácies domina a moscovite sobre a biotite e os granitos distinguem-se entre si pelo tamanho do grão e pela maior o menor frequência com que ocorrem esporádicos megacristais de feldspato potássico. Contudo, as diferenças são bastante subtis e nem sempre é fácil a sua identificação no terreno. De referir ainda que quer à escala de afloramento, quer à escala microscópica, de acordo com a caracterização de Godinho (1980), não há nestas rochas evidências de deformação no estado sólido, excetuando alguns indícios, localizados na fácies de Macieira de Alcôba. A descrição que se segue, com as principais características de cada fácies, é baseada no referido autor.

A fácies designada como *Granito do Caramulo* representa a maior parte da área aflorante do plutão. É de grão médio a fino e, por vezes, contém esporádicos megacristais de feldspato potássico com tamanhos que raramente ultrapassam os 2 cm (Fig. II.9A). Encraves metassedimentares e filões aplítico-pegmatíticos são raros.

Os *granitos de Almijofa e Paredes* localizam-se numa faixa, descontínua, no bordo do plutão que envolve a fácies central. As rochas destas duas fácies são as que apresentam uma granularidade mais grosseira e, tanto num caso como noutro, apresentam por vezes megacristais centimétricos de feldspato que podem chegar a conferir, sobretudo no granito de Paredes, um carácter porfiróide. Os filões de quartzo

e aplítico-pegmatíticos são abundantes e é frequente encontrar nos afloramentos do sector NE (fácies de Paredes) pequenos “schlieren” biotíticos (Fig. II.9B), que devem corresponder a restos da rocha metassedimentar encaixante.

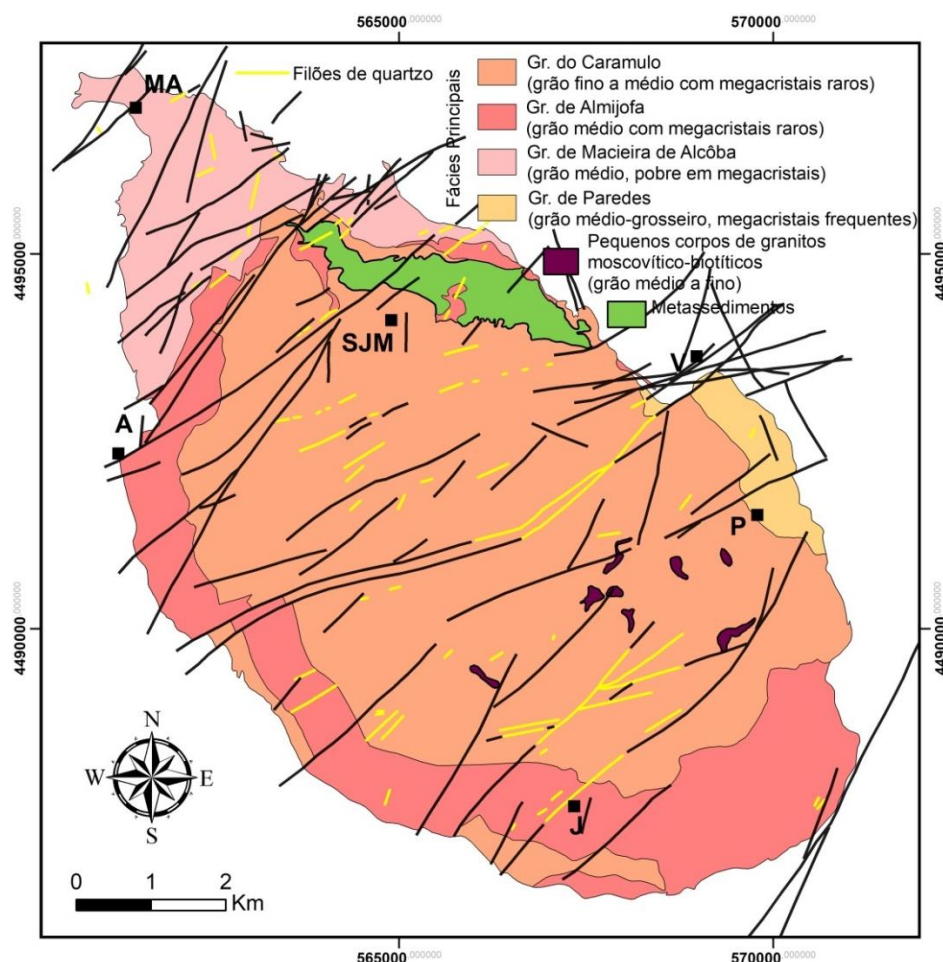


Figura II.8. Cartografia do plutão do Caramulo segundo Godinho (1980). A: Almijofa, J: Jueus, MA: Macieira de Alcôba, P: Paredes, SJM: São João do Monte, V: Varzielas.

O granito de Macieira de Alcôba, no extremo noroeste do maciço, também apresenta granulometria tendencialmente maior do que a fácies central (Fig. II.9D). Os megacristais de feldspato estão praticamente ausentes e também, como nos casos anteriores, este granito está cortado por numerosos veios aplítico-pegmatíticos e de quartzo. É nesta fácies que são observados aspetos macroscópicos indicativos de deformação: alinhamento subparalelo de agregados de quartzo policristalino, fracturação de cristais de feldspato e alinhamento de micas. Porém, estes aspetos são localizados e não se encontram presentes em toda a extensão da mancha granítica.

Além destas quatro fácies, Godinho (1980) cartografou vários corpos de pequenas dimensões, de granitos de grão médio a fino, porfiróides e não porfiróides, moscovítico-biotíticos dispersos na massa central (Fig. II.8).

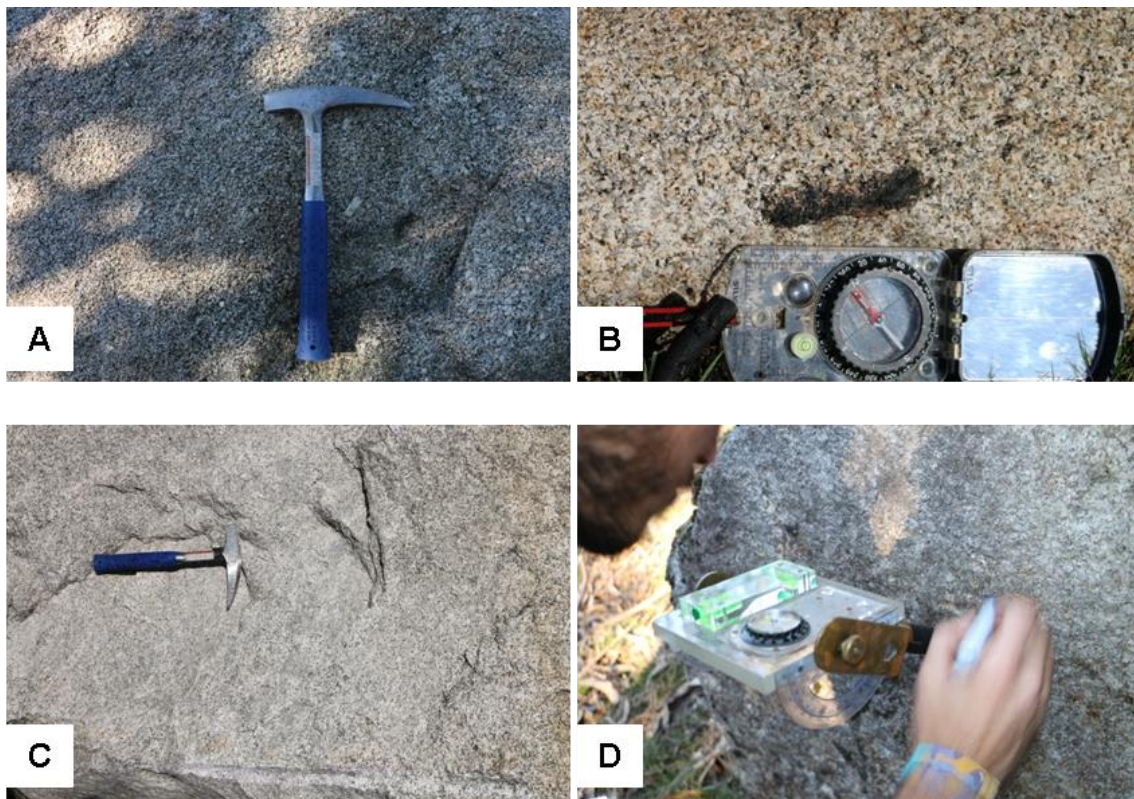


Figura II.9. Aspecto macroscópico dos granitos que constituem o plutão. A: Fácies do Caramulo (local de amostragem CRLM-13). B: “Schlieren” biotítico no granito de Paredes (local de amostragem CRLM-15). C: Granito de Almijofa (local de amostragem CRLM-17). D: Granito de Macieira de Alcôba (local de amostragem CRLM-18).

CAPÍTULO III

ANISOTROPIA DA SUSCETIBILIDADE MAGNÉTICA: PRINCIPIOS E METODOLOGIA

Nas últimas décadas tem-se assistido a um incremento da aplicação de métodos magnéticos para a identificação do “fabric” interno de corpos magmáticos. O conhecimento da estrutura interna dos plutões graníticos é indispensável para determinar os mecanismos de instalação dos magmas e para estabelecer as relações temporais entre plutonismo, tectónica e metamorfismo regional. A técnica da anisotropia da suscetibilidade magnética (ASM) adquire grande relevância em rochas plutónicas que possuem anisotropias pouco marcadas, onde a utilização dos métodos tradicionais de análise estrutural se torna difícil ou é insuficiente. Com efeito, a análise do “fabric” magnético constitui um método poderoso na sua caracterização estrutural já que fornece informação bastante precisa, à escala regional, sobre o padrão do fluxo no estado magmático e/ou no estado sólido (e.g. Bouchez, 2002).

Neste capítulo apresentam-se os fundamentos da técnica da anisotropia de suscetibilidade magnética (ASM) e descrevem-se as diferentes etapas do trabalho de obtenção e tratamento de dados.

III.1. Introdução à técnica da ASM

III.1.1. Suscetibilidade Magnética

A técnica da ASM baseia-se em que um material submetido à ação dum campo magnético externo (H) adquire uma magnetização induzida (M). Estes dois campos magnéticos estão relacionados entre si através da expressão:

$$M=K*H$$

Onde K é a *suscetibilidade magnética*. Deste modo, a suscetibilidade magnética traduz a maior ou menor capacidade de um corpo para ser magnetizado. K (= M/H) é adimensional e os seus valores diferem dependendo do sistema usado para quantificar

M e H. Na maior parte das publicações, assim como neste trabalho, são usadas as unidades do Sistema Internacional, de aí que os valores de K apresentam-se seguidos das siglas SI (e.g. $K = 9,0 \times 10^{-5}$ SI).

Tratando-se de uma propriedade anisotrópica, a suscetibilidade magnética pode ser expressa através de um tensor de segunda ordem, cuja representação geométrica é um elipsoide triaxial com eixos $K_1 \geq K_2 \geq K_3$ (Fig. III.1). A *suscetibilidade média* (K_m) vem dada pela média aritmética dos três eixos: $K_m = 1/3 (K_1 + K_2 + K_3)$.

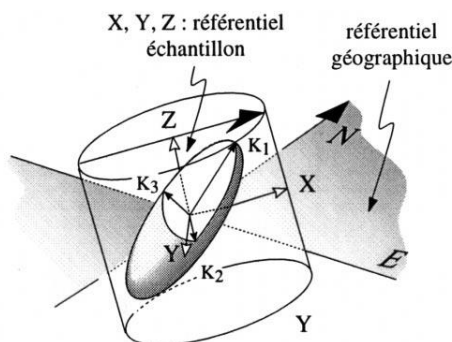


Figura III.1. Esquema com a orientação dos eixos do elipsoide de suscetibilidade magnética relativamente ao referencial geográfico de uma amostra (extraído de Bouchez, 2000).

III.1.2. Suscetibilidade magnética em rochas graníticas

Dependendo da natureza da magnetização induzida e da magnetização quando o campo é removido, os minerais podem mostrar diferentes tipos de comportamentos e ser agrupados nas seguintes categorias: paramagnéticos, diamagnéticos e ferromagnéticos (Fig. III.2).

No caso do *paramagnetismo* os momentos magnéticos dos átomos ficam alinhados, isto é, os materiais adquirem uma fraca magnetização na mesma direção que o campo externo aplicado. Quando este é removido, a magnetização desaparece. A suscetibilidade magnética é positiva e a magnetização depende linearmente do campo aplicado.

Os materiais *diamagnéticos* desenvolvem também uma fraca magnetização. Contudo, o campo magnético induzido (M) tem direção oposta à direção do campo magnético aplicado (H). A suscetibilidade magnética é negativa, depende linearmente do campo aplicado e quando este é removido, a magnetização desaparece.

Os momentos magnéticos dos átomos nos minerais *ferromagnéticos* estão sempre alinhados, mesmo na ausência de um campo externo ($H=0$). Ou seja, estes materiais exibem uma magnetização espontânea e possuem uma suscetibilidade magnética (K) muito superior à suscetibilidade dos paramagnéticos. Os diferentes tipos de ferromagnetismo estão esquematizados na figura III.2.

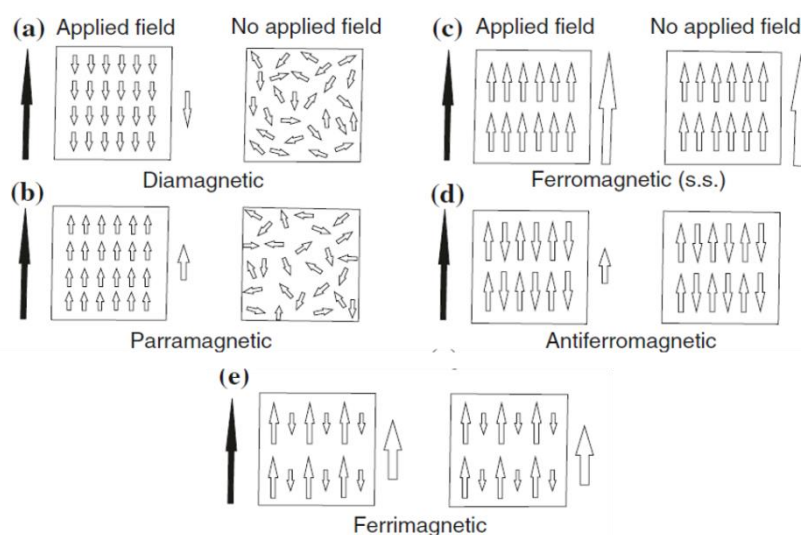


Figura III.2. Formas de magnetização. Os diagramas da esquerda de cada par de figuras mostram a magnetização adquirida (seta branca) por um material aquando a aplicação de um campo magnético externo (seta preta). Os esquemas da direita ilustram a magnetização que permanece após a retirada do campo magnético. (a) e (b) Materiais diamagnéticos e paramagnéticos, respetivamente. (c), (d) e (e) Três tipos de materiais ferromagnéticos (extraído de Dubey, 2014).

A magnetite é o mineral ferromagnético mais comum, enquanto a biotite, moscovite rica em ferro, anfíbola, clorite, piroxena, granada, epídoto e turmalina se incluem na classe dos minerais paramagnéticos e o quartzo no grupo de minerais diamagnéticos. A suscetibilidade magnética de uma rocha vai ser uma função das contribuições magnéticas dos seus constituintes minerais: $K = K_{\text{Para}} + K_{\text{Ferro}} + K_{\text{Dia}}$, embora na prática, no caso dos granitos, $K = K_{\text{Para}} + K_{\text{Ferro}}$ já que K_{Dia} é geralmente negligenciável (Bouchez, 1997).

Dependendo das proporções dos minerais paramagnéticos e ferromagnéticos presentes, é possível distinguir dois grandes grupos de granitos (Bouchez, 2000): (1) *granitos paramagnéticos*, com valores de K inferiores a 400×10^{-6} SI (Fig. III.3a) e (2) *granitos ferromagnéticos*, com valores de K superiores a 400×10^{-6} SI (Figura III.3b). Em termos mineralógicos, esta divisão reflete a ausência de magnetite na associação mineralógica dos primeiros e a sua presença nos segundos.

Os elementos responsáveis pela capacidade de magnetização dos minerais pertencem todos à família dos metais de transição da Tabela Periódica (e.g. Fe, Ni, Cr, Mn). Deste modo, os valores de K de uma rocha serão tanto maiores, quanto maior for o seu conteúdo em fases minerais que incorporam estes elementos, como é o caso dos minerais portadores de ferro. É por isso que os valores de K nos granitóides paramagnéticos aumentam com o aumento das suas proporções em minerais máficos

(leucogranitos → monzogranitos → granodioritos → tonalitos), como se pode observar nos exemplos da figura III.2a.

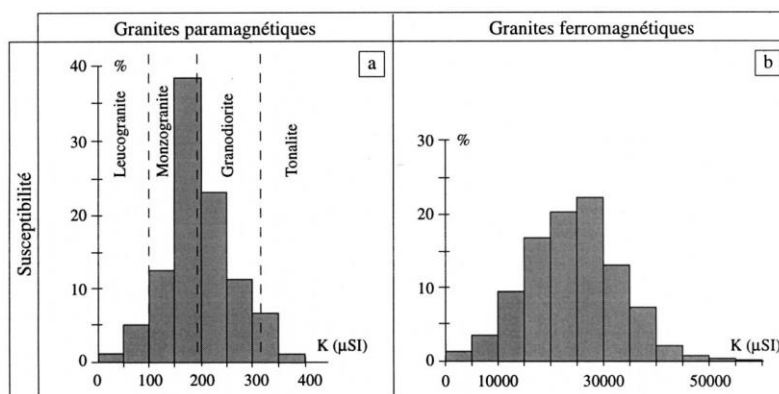


Figura III.3 - Suscetibilidades magnéticas em granitos paramagnéticos do Plutão de Mont-Luis-Andorra (Pirenéus) e ferromagnéticos do batólito da Serra Nevada (Califórnia). Extraído de Bouchez, 1999.

III.1.3. Anisotropia da suscetibilidade magnética

Quando a suscetibilidade magnética é medida numa amostra, o seu valor não é igual em todas as direções, sendo o elipsoide da suscetibilidade magnética a figura geométrica que representa o carácter anisotrópico desta propriedade. O eixo maior (K1) representa a lineação magnética e o eixo menor (K3) é perpendicular ao plano de foliação magnética. A orientação do elipsoide de ASM depende da dos minerais responsáveis pelo magnetismo induzido, tendo-se demonstrado que o eixo maior do elipsoide magnético (K1) é paralelo à lineação mineral e que o eixo menor (K3) é perpendicular à foliação da rocha. Por isso, a determinação da orientação do elipsoide relativamente ao referencial geográfico das amostras (Fig. III.1) constitui uma das etapas fundamentais na aplicação da técnica da ASM na caracterização estrutural das rochas graníticas.

A anisotropia das rochas é determinada através da medição da suscetibilidade segundo direções diferentes num susceptibilímetro. Os valores obtidos permitem quantificar o valor dos eixos do elipsoide de ASM e calcular uma série de parâmetros que caracterizam a forma do elipsoide e o grau de anisotropia dos materiais estudados. Entre os parâmetros mais usados destacam-se os seguintes:

- P ou anisotropia total ($P = K1/K3$)
- L ou anisotropia linear ($L = K1/K2$)
- F ou anisotropia planar ($F = K2/K3$)
- T ou parâmetro de forma de Jelinek (1981) ($T = [\text{Log}(K2/K3) - \text{Log}(K1/K3)] / [\text{Log}(K2/K3) + \text{Log}(K1/K2)]$).

Os 3 primeiros parâmetros costumam ser expressos em percentagem. O parâmetro de forma T tem a vantagem de incluir no seu cálculo as três suscetibilidades

principais e é expresso em valores inteiros, compreendidos entre -1 e +1. Para valores de $T < 0$, o elipsoide de ASM é prolato e a sua forma aproxima-se à de um charuto enquanto os elipsoides oblatos (forma de disco) possuem valores de $T > 0$. Para elipsoides intermédios $T = 0$ (Fig. III.4).

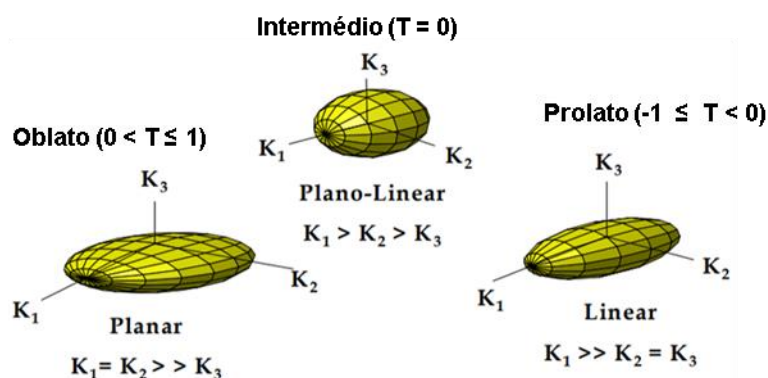


Figura III.4. Formas dos elipsoides ASM conforme o valor do parâmetro T (modificado de Gomes e Sant'Ovaia, 2015).

III.2. Metodologia de trabalho

A aplicação da técnica da ASM na região do Caramulo envolveu as seguintes etapas:

- Trabalho de campo com a realização de várias campanhas de amostragem
- Preparação das amostras para análise
- Medição da suscetibilidade magnética e da respetiva anisotropia
- Tratamento dos dados e elaboração de mapas de síntese

III.2.1. Trabalho de campo

A colheita de amostras para o estudo da suscetibilidade magnética no maciço granítico do Caramulo envolveu diversas campanhas de campo de um dia de duração efetuadas em duas fases distintas. A primeira, durante o ano letivo de 2012-13, foi levada a cabo pela Engenheira Sara Sousa, na altura estudante da Licenciatura em Engenharia Geológica, e a segunda realizada nos meses de Novembro e Dezembro de 2017. No conjunto, foram amostrados 27 afloramentos e recolhidas 117 amostras orientadas. O mapa da figura III.5 mostra a localização das estações amostras.

Para a recolha de amostras utilizou-se uma sonda portátil e com a ajuda do amostrador, ao qual está adaptado uma bússola e um clinómetro, orientaram-se as amostras medindo-se o azimuth e a inclinação (Fig. III.6). Em cada espécime foi assinalada a linha cuja orientação foi medida e, através de setas, indicado o topo e a

base do carote. Por fim, cada amostra foi devidamente referenciada com o respetivo número.

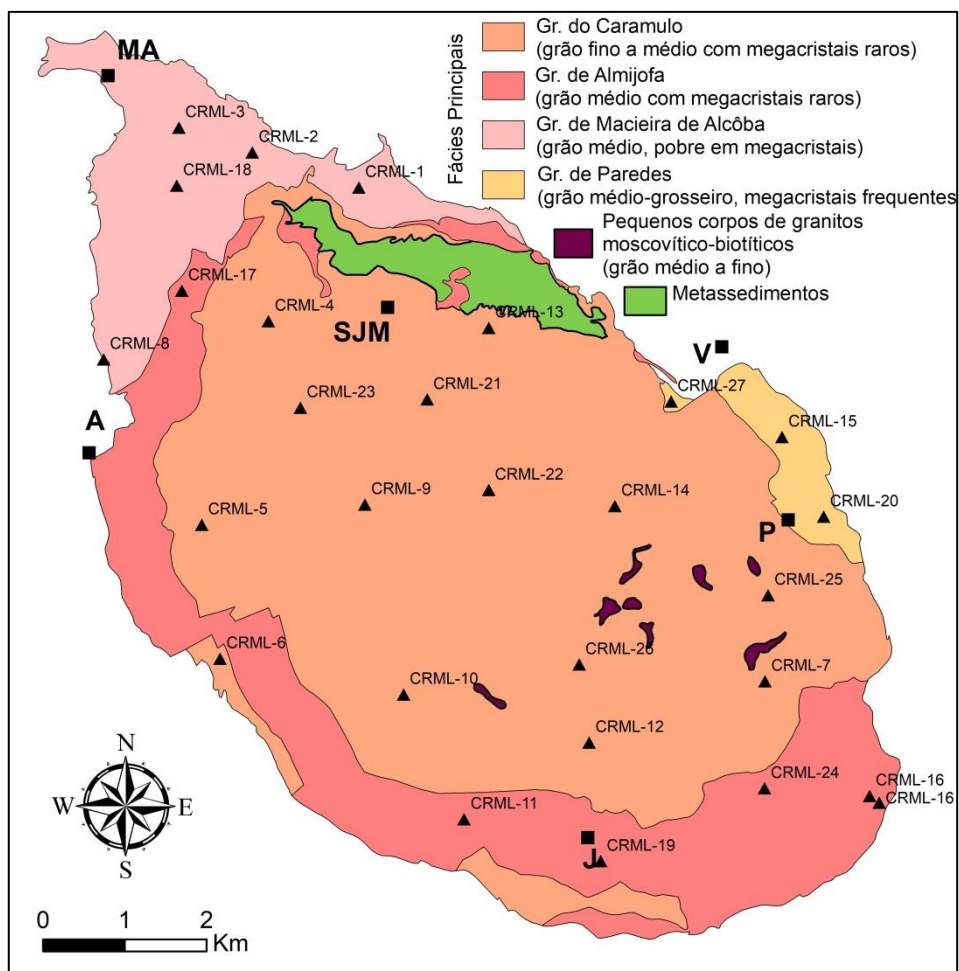


Figura III.5. Mapa de amostragem.



Figura III.6. Equipamento usado na amostragem. A: Sonda portátil com bomba de água acoplada para arrefecimento e lubrificação, caixa com bússola e amostrador incorporado. B: Aspecto da bússola com o tubo amostrador. C: orientação da amostra antes de ser retirada do afloramento.

III.2.2. Preparação das amostras

A preparação das amostras para análise envolveu o corte das carotes em subamostras; a referenciação das subamostras e a medição do respetivo volume.

As amostras cilíndricas recolhidas no campo têm diâmetros “standard” de 24 mm mas o comprimento é bastante variável, podendo atingir os 10 cm. Para as poder introduzir no susceptibilímetro, devem ser seccionadas de modo a obter subamostras com 22 mm de altura. Os fragmentos que não cumprem as dimensões requeridas são descartados e podem ser usados para a confeção de lâminas delgadas.

A operação de corte foi levada a cabo com auxílio de uma serra já calibrada para seccionar as amostras de acordo com as dimensões requeridas (Fig. III.7).

Seguidamente procedeu-se à numeração dos novos tarolos e cada subamostra foi identificada através da mesma referência do cilindro original seguida das letras A, B, C ... para as diferenciar (e.g. CR22A, CR22B). Por fim, com uma craveira mediu-se o diâmetro e a altura de cada subamostra para calcular numa folha Excel o respetivo volume (Anexo).

A etapa da preparação das amostras termina com o desenho de novas marcas nas subamostras, necessárias para a sua correta inserção no porta-amostras do susceptibilímetro na fase seguinte. No topo da subamostra são colocadas uma seta e duas linhas curtas numa posição perpendicular à seta, como se ilustra na figura III.7C. Para o efeito, usou-se um pequeno acessório com ranhuras que facilitou a tarefa (Fig. III.8).

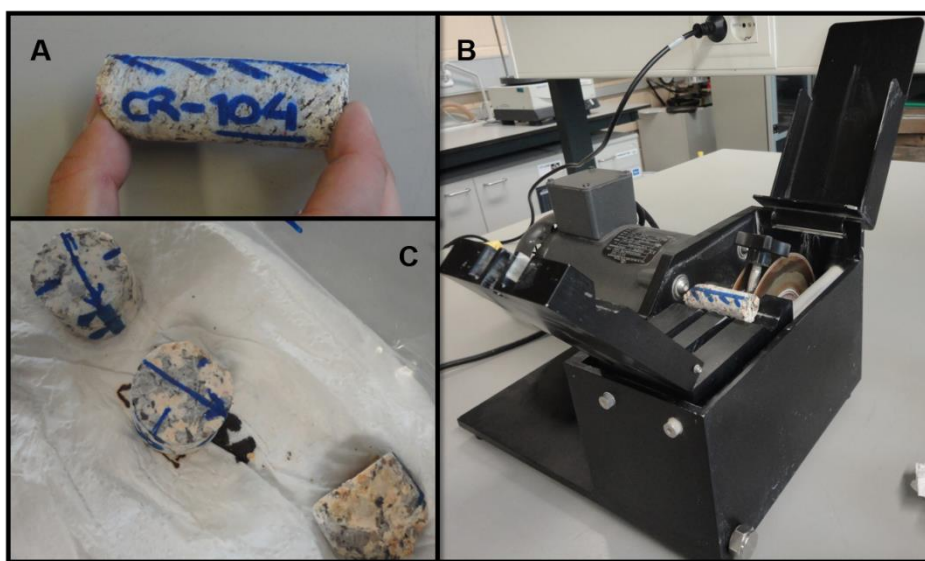


Figura III.7. A: Amostra cilíndrica colhida no campo com a sua referência e marcas de orientação. B: Máquina de corte, modelo *Baldor.Reliancer industrial motor VL3501-50*, do Departamento de Geociências, Ambiente e Ordenamento do Território da FCUP. C: Subamostras obtidas após o corte com novas marcas de orientação.

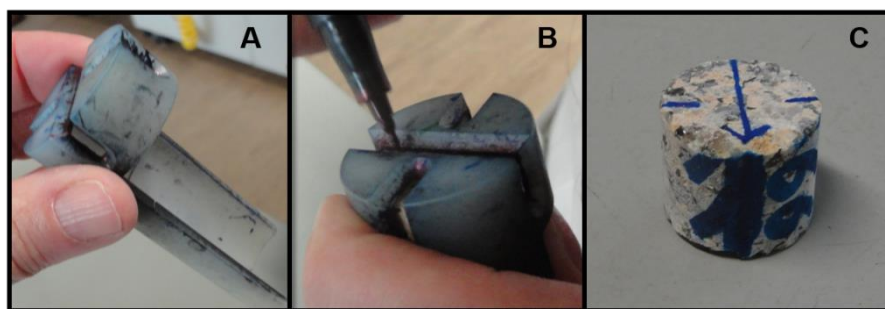


Figura III.8. A: Acessório em plástico usado na marcação das subamostras. B: Desenho das linhas de referência no topo da subamostra. C: Subamostra com todas as marcas necessárias para a sua colocação no susceptibilímetro.

III.2.3. Medição da suscetibilidade magnética e da respetiva anisotropia

O susceptibilímetro é um aparelho que através da aplicação de um campo magnético de baixa intensidade a cada subamostra permite medir a sua suscetibilidade magnética e determinar a sua anisotropia. Neste trabalho, utilizou-se um susceptibilímetro magnético *Kappabridge KLY-4* instalado num dos laboratórios do DGAOT da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto (Fig. III.9). O equipamento tem um computador acoplado onde está instalado um *software* especialmente concebido para o efeito (SURFAR 1.1).

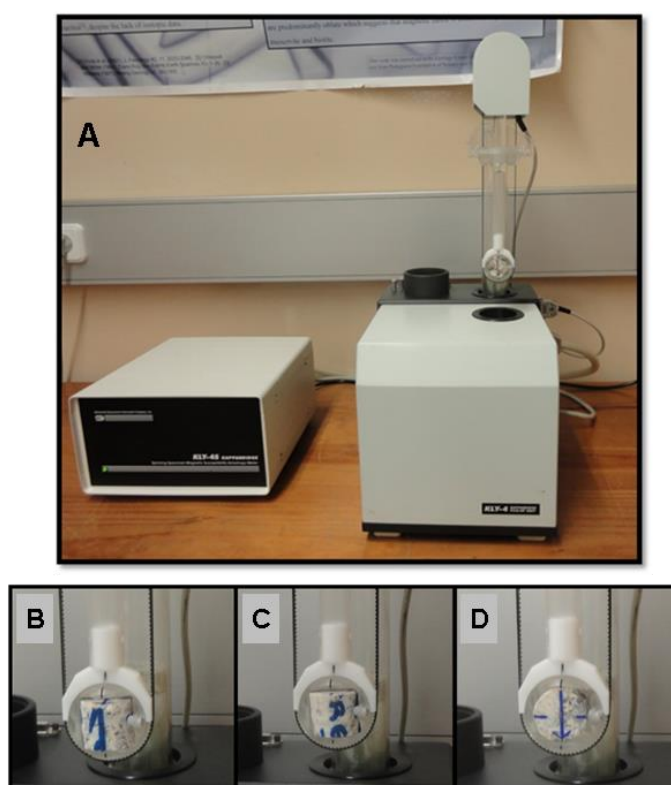


Figura III.9. A: Susceptibilímetro *Kappabridge KLY-4S.A* instalado num dos laboratórios do DGAOT da FCUP. B, C e D: as três posições em que a subamostra é colocada no porta-amostras do susceptibilímetro.

Apos a calibração do aparelho, na aplicação SURFAR são introduzidos os dados de cada espécime: referência, volume, azimuth e inclinação. Depois, coloca-se a subamostra na primeira posição (Fig. III.9B) e efetua-se a 1ª medição. Repete-se o procedimento para a 2ª posição (Fig. III.9C) e para a 3ª posição (Fig. III.9D). O valor da suscetibilidade média obtém-se através duma nova leitura na 3ª posição.

A aplicação SUFAR permite que os dados do susceptímetro sejam guardados em dois tipos de formatos: como ficheiros com extensão *.txt* (*Plain text*) e como ficheiros com extensão *.ran* (*RAN file*). A vantagem dos segundos reside na sua compatibilidade com o *software* ANISOFT4.2, usado para o tratamento dos dados de ASM.

III.2.4. Tratamento dos dados e elaboração de mapas de síntese

Os resultados das medições de todas as subamostras são recompilados e tratados com o programa ANISOFT4.2 (Chadima e Jelínek, 2009) o qual pode ser obtido gratuitamente em <http://www.agico.com/software/winsoft/anisoft/>. Os dados relativos a todas as subamostras de cada uma das estações são guardados em ficheiros com o nome da estação correspondente e a extensão *.ran*. Assim, para cada local de amostragem a análise estatística efetuada pelo *software* permite obter as seguintes informações (Fig. III.10):

- O azimuth e inclinação dos eixos do elipsoide médio da estação (K1, K2 e K3), com indicação do grau de dispersão de valores através de ângulos de confiança para os três eixos ($\alpha K1$ Máx, $\alpha K1$ min, $\alpha K2$ Máx, $\alpha K2$ min, $\alpha K3$ Máx e $\alpha K3$ min);
- O valor da suscetibilidade média (K_m) correspondente à média aritmética das suscetibilidades médias das subamostras da estação;
- O valor dos parâmetros de anisotropia (P, L, F, T, entre outros) para a estação;

O ANISOFT4.2 faz diversos tipos de gráficos binários onde se relacionam os diferentes parâmetros de anisotropia entre si e com a suscetibilidade média. O programa mostra também a projeção estereográfica dos eixos dos elipsoides de ASM das subamostras e do elipsoide médio da estação e, ainda, as elipses de confiança (Fig. III.10).

Para finalizar, todos os dados relativos a todos os locais de amostragem foram compilados num ficheiro EXCEL que foi exportado para o *software* ArcGIS 10.3, onde previamente tinham sido desenhados mapas georreferenciados da região do Caramulo. Neste sistema de informação geográfica, usando as ferramentas adequadas, construíram-se os mapas de isovalores e de orientação da lineação e foliação magnéticas do plutão do Caramulo, apresentados no próximo capítulo.

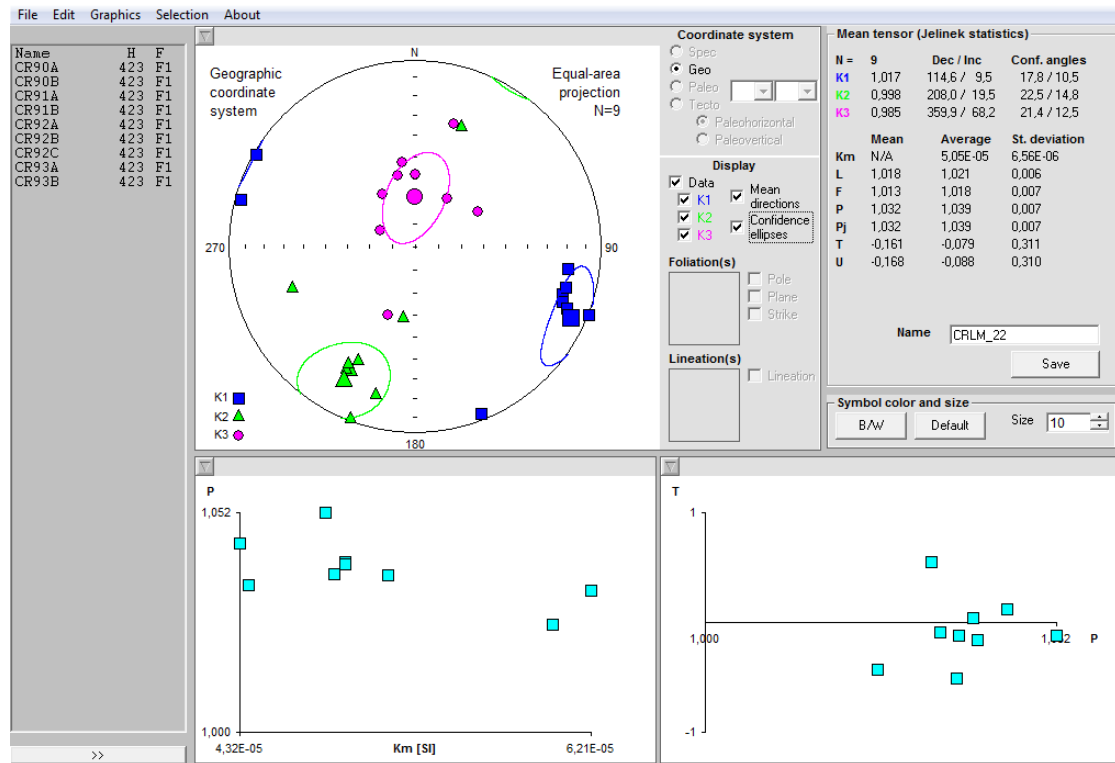


Figura III.10. Dados relativos à estação CRML-22 no programa ANISOFT4.2.

CAPÍTULO IV

“FABRIC” MAGNÉTICO DO GRANITO DO CARAMULO

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados do estudo estrutural levado a cabo no plutão do Caramulo com a técnica da anisotropia da suscetibilidade magnética (ASM). Os dados tiveram como ponto de partida as amostras recolhidas nas 27 estações no plutão que foram tratadas de acordo com a metodologia antes descrita. No mapa da figura III.5 mostra-se a localização dos afloramentos amostrados e os dados de suscetibilidade magnética obtidos para cada estação foram compilados na Tabela IV.1, no final deste capítulo.

IV.1. Suscetibilidade Magnética

A suscetibilidade magnética média, abreviadamente K_m , é a média aritmética da suscetibilidade correspondente a cada um dos 3 eixos do elipsoide de ASM ($K_m = (K_1 + K_2 + K_3) / 3$). O valor de K_m para cada estação foi calculado a partir da média dos K_m das amostras colhidas nessa estação.

As rochas estudadas possuem uma suscetibilidade magnética bastante baixa, oscilando entre $2,1 \times 10^{-5}$ e $9,0 \times 10^{-5}$ SI (Fig. IV.1), na mesma gama de valores que outros granitos sintectónicos de duas micas da ZCI (Noronha *et al.*, 2013). No entanto, no caso do maciço do Caramulo, a abundância de moscovite em detrimento da biotite manifesta-se pelos baixos valores de K_m obtidos na maior parte das amostras ($K_m < 6,0 \times 10^{-5}$ SI em 70% das estações).

O mapa de isovalores da figura IV.2A permite visualizar a variação espacial da suscetibilidade nas rochas que formam o plutão do Caramulo, verificando-se que as amostras com suscetibilidades mais elevadas tendem a concentrar-se na zona nordeste do plutão, sobretudo no sector ocupado pela fácies de Paredes e na transição entre a fácies principal do Caramulo e a de Almijofa.

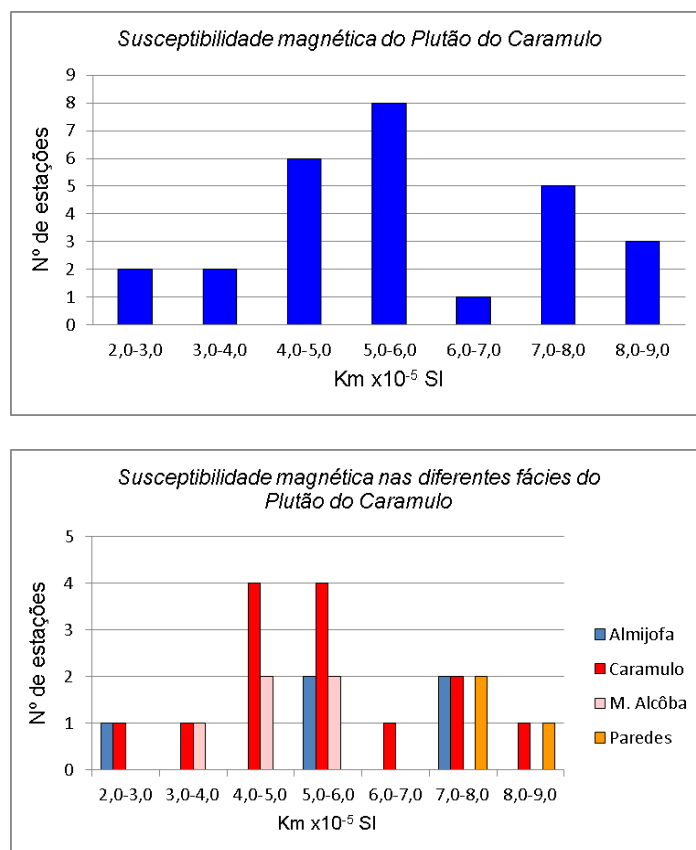


Figura IV.1. Histogramas de frequência do valor da suscetibilidade magnética das rochas do granito do Caramulo. O primeiro gráfico mostra a variação de Km no conjunto das amostras e o segundo ilustra as diferenças/semelhanças de suscetibilidade entre as fácies cartografadas no plutão.

Dado que existe uma relação direta entre o valor de Km e o conteúdo em ferro das rochas, é frequente encontrar na bibliografia exemplos de correspondência entre mapas de isovalores de Km e a cartografia das fácies petrográficas (e.g. Amice e Bouchez, 1989; Gleizes *et al.*, 1991, 1993; Aranguren e Tubia, 1994; Bouchez, 1997, 2000; Sant’Ovaia, *et al.* 2010; Valle Aguado *et al.*, 2017). No caso dos granitos do plutão do Caramulo a biotite é a principal fase mineral a condicionar a suscetibilidade magnética das amostras, por isso, os domínios onde ocorrem os valores mais altos de Km devem refletir a presença de fácies relativamente mais ricas em biotite. O mapa da figura IV2B foi elaborado com base na percentagem modal de biotite nos diferentes sectores do plutão, tendo como base as análises modais contidas no trabalho de Godinho (1980). A comparação entre os dois mapas da figura IV.2 mostra uma correlação razoavelmente boa, identificando-se os valores mais elevados de Km e de % em biotite nos mesmos sectores do plutão.

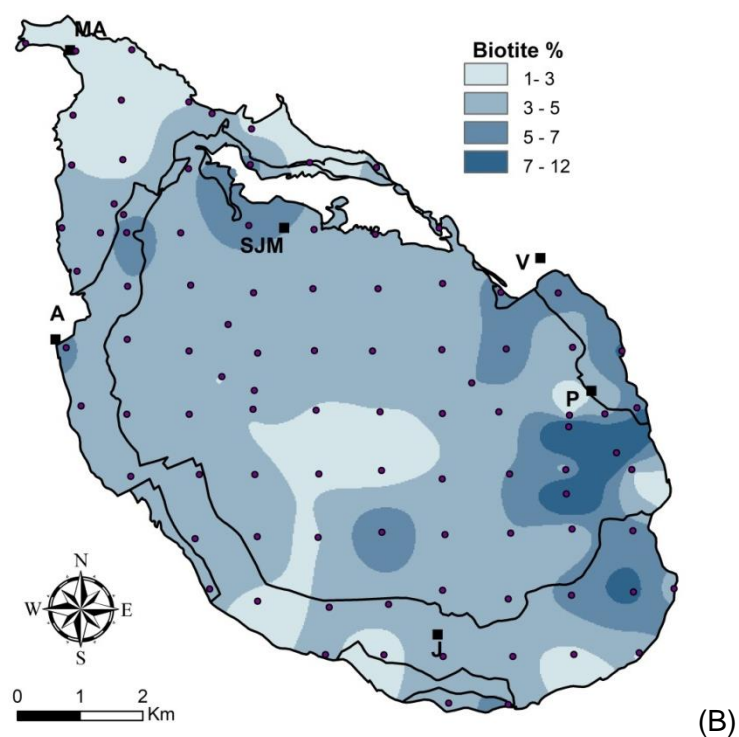
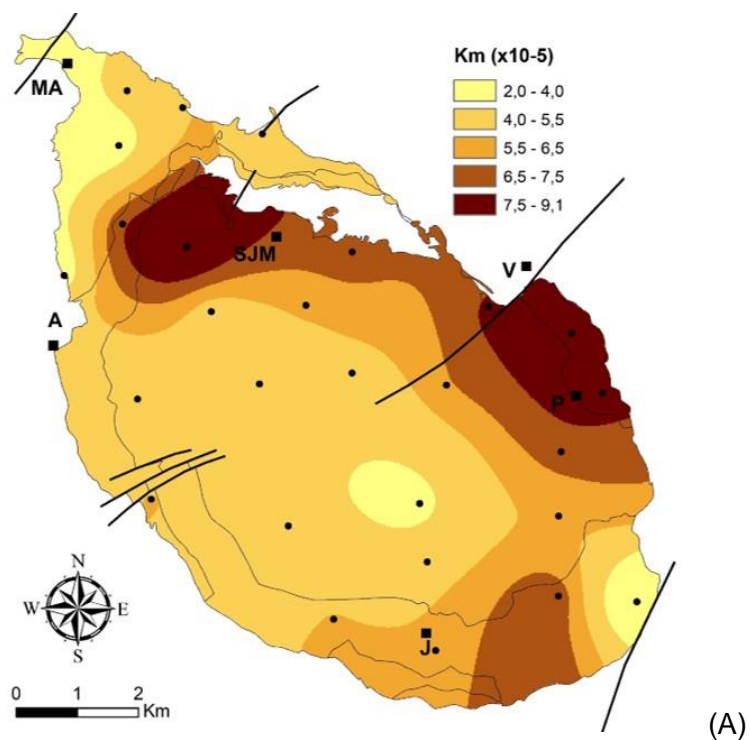


Figura IV.2. A: Valores da suscetibilidade magnética (Km). Os pontos indicam os locais de amostragem e os contactos internos referem-se aos limites entre as fácies graníticas individualizadas por Godinho (1980). B: Mapa de isovalores com a percentagem modal de biotite (os pontos indicam os pontos de amostragem de Godinho, 1980). A, Almijofa; J: Jueus; MA: Macieira de Alcôba; P, Paredes. SJM: São João do Monte, V: Varzielas.

IV.2. ASM: dados escalares

A anisotropia da suscetibilidade magnética foi quantificada através dos parâmetros da anisotropia total ($P\% = 100 \times [(K1/(K3)-1)]$) e do parâmetro de forma ($T = 2x(\ln K2-\ln K3)/(\ln K1-\ln K3)-1$).

As rochas possuem uma anisotropia baixa ($2,1\% < P\% < 9,0\%$) e a maior parte do plutão apresenta valores de $P\%$ inferiores a 4%, sem uma relação óbvia com a suscetibilidade magnética (histograma da Fig. IV.3). Nota-se, contudo, que os locais onde o $P\%$ é mais elevado possuem também suscetibilidades mais altas, em comparação com a encontrada na maior parte das estações. Considerando o conjunto, este grau de anisotropia, tão baixo, é frequente em granitos paramagnéticos onde predominam os “fabrics” magmáticos (e.g. Bouchez, 2000; Román-Berdiel *et al.*, 2006; Gébélín *et al.*, 2006), o que está de acordo com a ausência generalizada de estruturas de deformação no estado sólido nas amostras estudadas. Como se pode constatar no mapa da Fig. IV.3, os granitos mais anisotrópicos situam-se na periferia do maciço, sobretudo nas proximidades do contacto nordeste, onde são atingidos valores claramente mais elevados que no resto do plutão. Em linhas gerais coincidem com as zonas onde a suscetibilidade e a % de biotite são mais elevadas, pelo que a maior abundância deste mineral poderá estar a facilitar uma melhor definição do “fabric”.

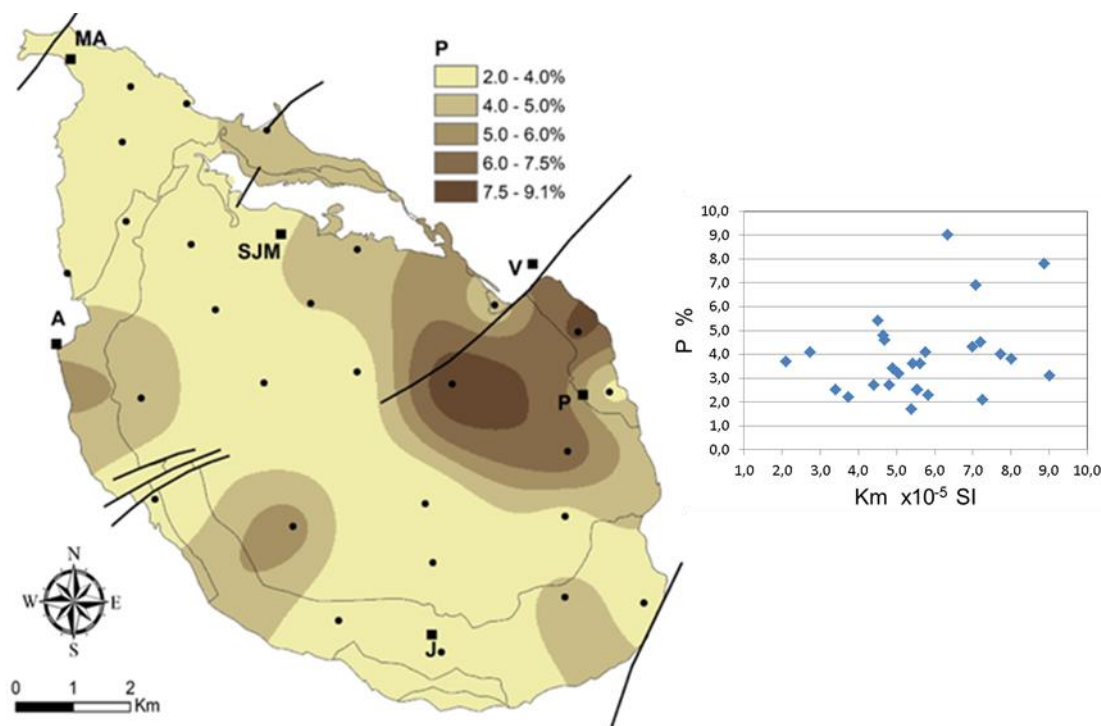


Figura IV.3. Distribuição dos valores anisotropia total $P\%$ no plutão do Caramulo. Do lado direito, diagrama $P\%$ versus suscetibilidade magnética (Km).

Os valores do parâmetro de forma (T) oscilam entre -0,718 e 0,844. O elipsoide magnético é planar ($T > 0$, elipsoides oblatos) na maior parte das estações, no entanto, os dados adquiridos permitem definir um amplo sector na parte central do plutão e outros de menor extensão nos extremos NO e SE do maciço onde T tem valores negativos, indicando que nesses locais predomina o “fabric” linear. Refira-se ainda que nos locais com os valores mais elevados de anisotropia ($P\% \geq 4,3$) a forma do elipsoide é sempre oblata ou intermédia (Fig. IV.4B). Por outro lado, não parece haver qualquer influência do valor da suscetibilidade magnética e o valor do parâmetro T (Fig. IV.4C).

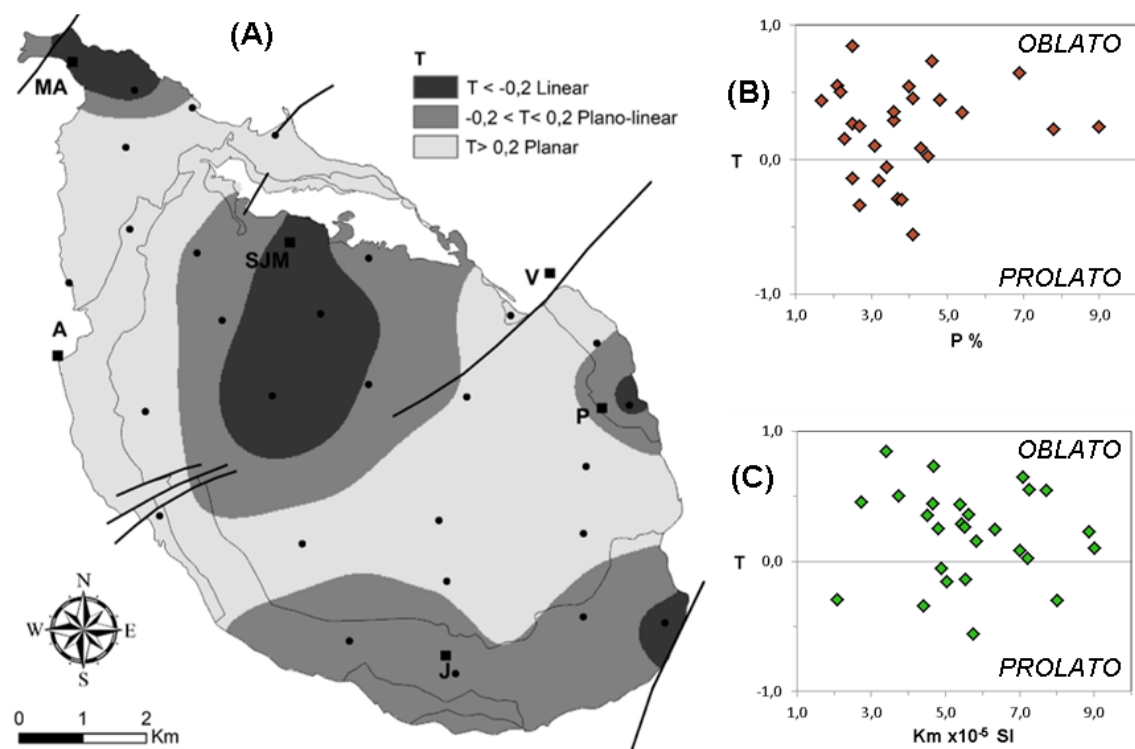


Figura IV.4. A: Mapa de isovalores do parâmetro de forma T . B: Diagrama T versus grau de anisotropia ($P\%$). C: Diagrama T versus suscetibilidade média (Km).

IV.3. Dados de orientação

A orientação dos três eixos do elipsoide da ASM em cada estação de amostragem foi obtida através do *software* ANISOFT4.2. A estatística implementada pelo programa calcula a orientação média do K_1 , K_2 e K_3 e fornece as elipses de erro para cada eixo através dos respetivos ângulos de confiança (Fig. IV.10).

IV.3.1. Variabilidade dos dados de orientação

O valor dos ângulos de confiança proporciona indicação quantitativa da dispersão dos dados a partir dos quais são obtidas as orientações médias dos eixos do elipsoide de ASM. Assim, quando a dispersão é baixa, o ângulo do cone de confiança é pequeno e quanto maior é a dispersão, maior é o ângulo do cone.

Na tabela IV.1, encontram-se os ângulos de confiança, máximo (α_{\max}) e mínimo (α_{\min}), dos eixos do elipsoide em cada estação de amostragem. Contudo, os gráficos da figura IV.5 facilitam a análise destes dados e permitem ter uma visão de conjunto da dispersão encontrada.

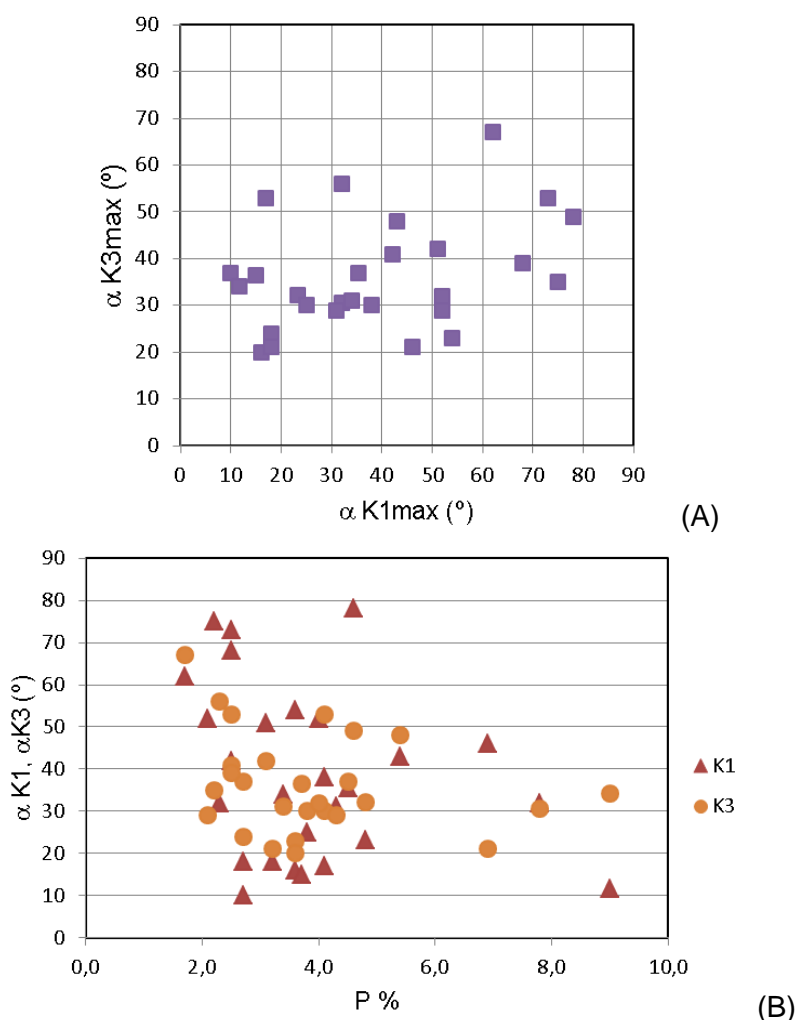


Figura IV.5. (A): Projeção dos ângulos de confiança máximos dos eixos K1 e K3. (B): Diagrama onde se relacionam os ângulos de confiança de K1 e K3 com o grau de anisotropia (P %).

Regra geral, os ângulos de confiança quer do K1 quer do K3 são bastantes grandes em numerosas estações ($10^{\circ} < \alpha K1_{\max} < 78^{\circ}$ e $20^{\circ} < \alpha K3_{\max} < 67^{\circ}$), refletindo a

baixa anisotropia dos granitos do Caramulo. Note-se que há uma tendência para diminuição do ângulo nos locais onde o grau de anisotropia é mais elevado (Fig. IV.5B).

A amplitude dos cones de confiança pode também estar condicionada pelo “fabric” da rocha, ou, dito de outro modo, pela forma do elipsoide. Assim, em “fabrics” planares (elipsoides oblatos) $\alpha K1$ costuma apresentar valores elevados enquanto $\alpha K3$ é bastante menor. Em contraste, as rochas com um “fabric” linear (elipsoides prolatos) $\alpha K1$ tendem a possuir valores baixos e $\alpha K3$ altos (e.g. Yenes *et al.*, 1999; Mellado *et al.*, 2006) (Fig. IV.6).

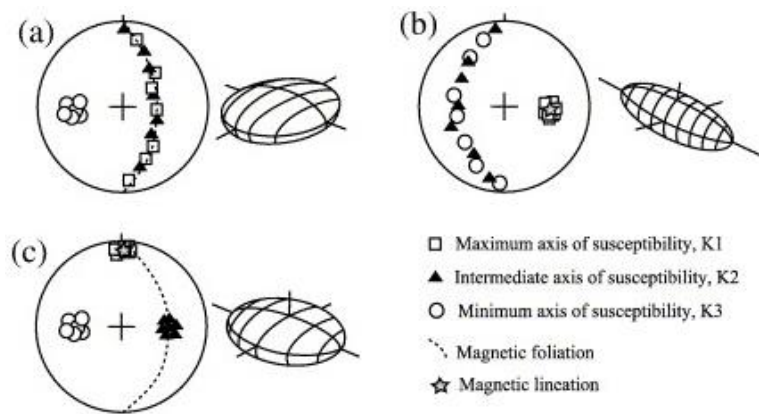


Figura IV.6. Projeções estereográficas e formas dos elipsoides de ASM correspondentes a formas oblatas (a), prolatas (b) e a elipsoides intermédios (c). Adaptado de Borradaile e Henry, 1997).

IV.3.2. Foliação e lineação magnéticas

Os mapas da figura IV.7 mostram as orientações da foliação e lineação magnéticas no plutão do Caramulo.

A atitude da foliação (plano perpendicular a K3) é bastante variável, não só em termos de azimuth, como também em termos de pendur, podendo ser encontrados bastantes locais onde a inclinação é inferior a 20°. Embora algo interpretativas, as trajetórias desenhadas permitem visualizar melhor a estrutura interna do plutão, apontando para a definição de um padrão concêntrico, subparalelo aos contactos na maior parte do plutão, salvo no bordo sudeste onde a foliação é NO-SE e o limite do granito é controlado tectonicamente por uma falha NE-SO. Se, como parece, a foliação está condicionada pela orientação dos contactos, os fracos pendores com que se apresenta em numerosos afloramentos sugere que a parte exposta poderá corresponder à cúpula do plutão.

A lineação magnética (K1 do elipsoide) apresenta inclinações bastante baixas em numerosos locais e, ainda que a direção NO-SE seja claramente dominante, o mergulho tanto pode ser para NO como para SE (Fig. IV.7). As duas estações na metade sul do

maciço, onde a lineação é praticamente vertical, possivelmente assinalam a localização de canais de alimentação da câmara magmática durante a instalação do granito.

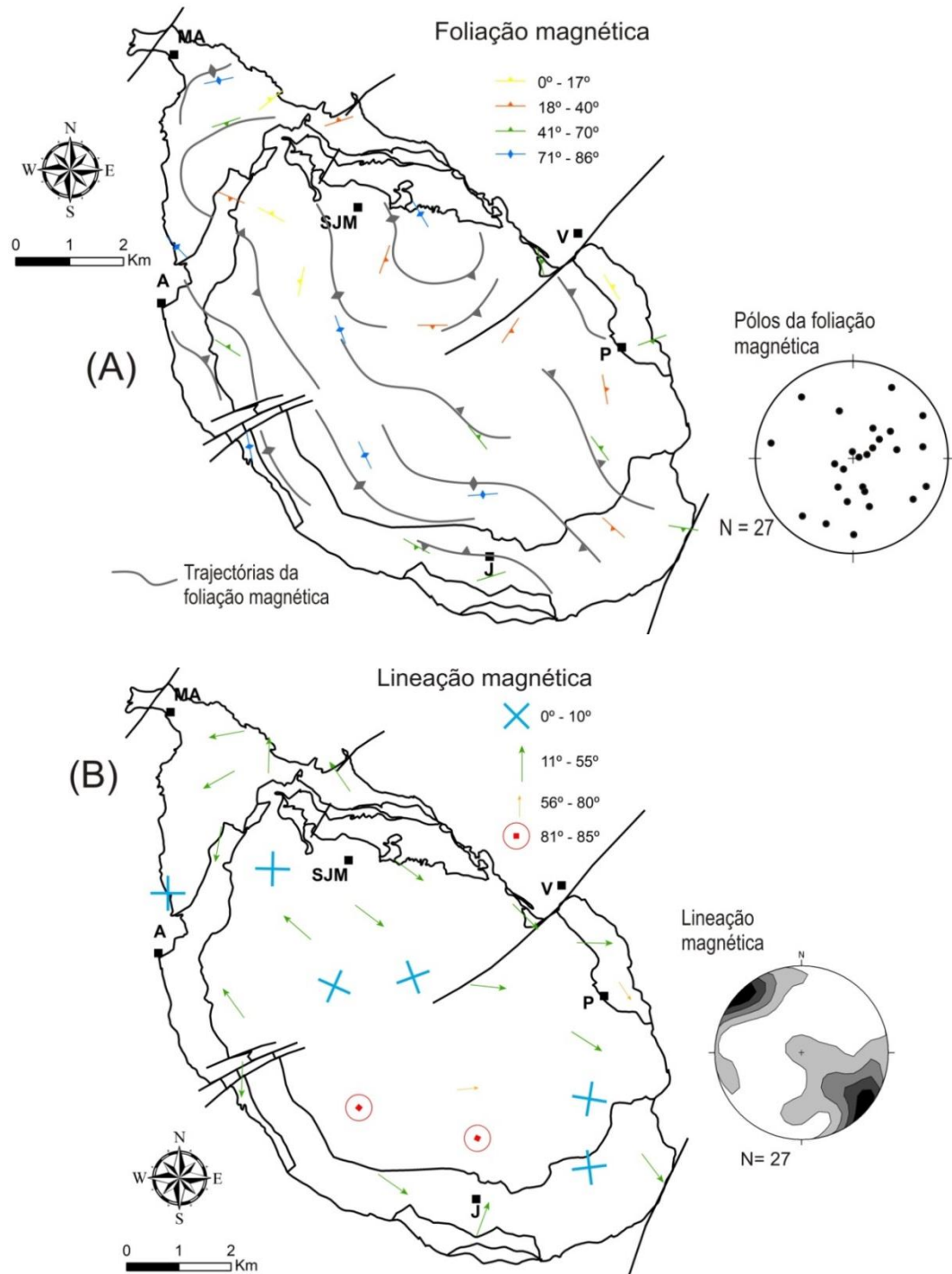


Figura IV.7. (A) Orientações da foliação magnéticas e projeção estereográfica igual-área dos polos da foliação. (B): Orientações da lineação magnéticas e projeção estereográfica igual-área das lineações magnéticas.

Tabela IV.1. Resultados das medições de ASM das rochas graníticas do plutão do Caramulo. Km: suscetibilidade média, P: parâmetro de anisotropia total, T: parâmetro de forma (Jelinek, 1981), azimute e inclinação da suscetibilidade máxima (K1) e mínima K3), α_{\min} , α_{\max} : ângulos de confiança mínimo e máximo, respetivamente.

Local	Coordenadas (UTM-WGS84)		Fácies	Km (10^{-5} SI)	P (%)	T	K ₁				K ₃			
	X	Y					Azim. (°)	Incl (°)	α_{\min} (°)	α_{\max} (°)	Azim. (°)	Incl (°)	α_{\min} (°)	α_{\max} (°)
1	564666	4495795	M Alcôba	4,7	4,6	0,732	325	24	19	78	162	65	19	49
2	563366	4496225	M Alcôba	5,4	3,6	0,288	2	13	13	54	140	74	14	23
3	562458	4496500	M Alcôba	4,4	2,7	-0,344	260	16	5	18	168	7	13	24
4	563439	4493948	Caramulo	9,0	3,1	0,100	316	5	27	51	208	74	28	42
5	562626	4491460	Caramulo	4,7	4,8	0,441	324	31	10	23	213	31	6	32
6	562850	4489822	Caramulo	5,5	2,5	0,263	182	37	18	73	78	17	21	53
7	569503	4489546	M Alcôba	5,6	3,6	0,355	324	0	14	16	234	40	15	20
8	561428	4493479	Caramulo	2,7	4,1	0,453	315	7	16	38	46	12	13	30
9	564619	4491705	Caramulo	5,4	1,7	0,435	339	7	55	62	240	50	25	67
10	565090	4489385	Caramulo	4,5	5,4	0,349	40	84	17	43	245	5	16	48
11	565830	4487858	Almijofa	5,6	2,5	-0,140	125	11	27	42	29	27	27	41
12	567358	4488795	Caramulo	4,8	2,7	0,247	296	81	4	10	176	5	3	37
13	566132	4493866	Caramulo	7,2	4,5	0,021	126	48	9	35	239	19	7	37
14	567672	4491687	Caramulo	6,4	9,0	0,242	96	23	8,5	12	304	64	10	34
15	569714	4492531	Paredes	8,9	7,8	0,225	91	13	2,8	32	238	75	3,6	31
16	570782	4488144	Almijofa	2,1	3,7	-0,296	143	43	10	15	9	37	9,8	37
17	562382	4494322	Almijofa	7,3	2,1	0,547	189	26	25	52	18	63	25	29
18	562321	4495606	M Alcôba	3,4	2,5	0,844	241	12	21	68	342	43	18	39
19	567497	4487347	Almijofa	5,8	2,3	0,153	20	39	9	32	163	45	28	56
20	570223	4491557	Paredes	8,0	3,8	-0,301	147	62	7	25	340	28	13	30
21	565378	4492992	Caramulo	5,8	4,1	-0,562	127	19	11	17	290	70	11	53
22	566130	4491884	Caramulo	5,1	3,2	-0,161	115	10	11	18	360	68	13	21
23	563831	4492891	Caramulo	4,9	3,4	-0,059	311	11	25	34	101	77	14	31
24	569500	4488238	Almijofa	7,0	4,3	0,081	308	2	8	31	42	69	15	29
25	569543	4490598	Caramulo	7,1	6,9	0,643	123	21	11	46	260	63	11	21
26	567235	4489751	Caramulo	3,7	2,2	0,499	85	58	24	75	232	28	21	35
27	568360	4492967	Paredes	7,7	4,0	0,541	135	34	31	52	257	38	20	32

CAPÍTULO V

ESTUDO DA FRACTURAÇÃO

A fracturação de um maciço rochoso é uma das informações mais importantes no que respeita á sua caracterização, pretendendo-se com este estudo caracterizar melhor o plutão do Caramulo.

O estudo da fracturação do granito do Caramulo foi baseado em duas vertentes: A primeira consistiu na utilização de imagens aéreas que permitiram a caracterização geral da fracturação; A segunda consistiu na medição da atitude (direção e pendor) das diaclases colhidas em alguns dos locais da amostragem, considerados importantes para a sua caracterização.

I.1. Observação de imagens aéreas

Apesar das diaclases poderem apresentar pouca continuidade (algumas apenas têm extensão de 1 a 10 metros), em determinadas regiões as diaclases “principais” têm uma continuidade muito grande (vários quilómetros). É frequente o estudo da fotografia aérea de uma dada região ser um método eficaz para a identificação de sistemas de estruturas planares, fraturas e diaclases porque estas influenciam a geomorfologia da superfície e são facilmente identificadas. Muitos dos alinhamentos que se observam na fotografia aérea são diaclases com grande extensão e continuidade.

Atualmente, com a disponibilidade de imagens aéreas de todo o globo terrestre é possível fazer uma análise detalhada de muitas das características geológicas de uma dada região com destaque para a fracturação. No caso do plutão do Caramulo é sintomático.

Plataformas como o *ArcGlobe*, *GoogleEarth* e *BingMaps*, para só referir algumas, oferecem imagens aéreas obtidas por sensores montados em satélites a que o cidadão comum tem acesso facilitado.

Para o caso do plutão do Caramulo as imagens aéreas disponibilizadas naquelas plataformas revelaram-se muito úteis para a identificação e marcação de fraturas e falhas presentes na área estudada. Para além disso, esta possibilidade aliada à facilidade de pesquisar imagens captadas em diferentes datas conjugada com a possibilidade de observação em perspetiva, permitem escolher e conjugar a informação que delas é possível retirar para melhor caracterizar a fracturação (Fig. V.1).



Figura V.1. Imagem aérea captada do *GoogleEarth* (datada de 10/12/2018), na qual se pode observar a fracturação geral existente no plutão do Caramulo.

O mapa geológico da região do Caramulo de Ávila Martins publicado em 1962 (Fig. II.6) mostra algumas falhas cartografadas pelo autor e o trabalho de Godinho (1980) veio trazer ainda mais informação sobre as fraturas e falhas existentes no plutão mostrando também que algumas delas estão concordantes com filões de quartzo (Fig. II.8). As orientações predominantes são NE-SO a ENE-OSO.

Contudo, a análise detalhada da fotografia aérea cor na escala aproximada 1/22.000 datada de maio de 1998 e das imagens satélite disponíveis no *ArcGlobe* e *GoogleEarth* permitiram revelar que, para além das referidas nos dois trabalhos já mencionados, existem outras, nomeadamente NNO-SSE a acrescentar às anteriores (Fig. V.2). No extremo noroeste e junto ao limite cartográfico sudeste são mais difíceis de observar.

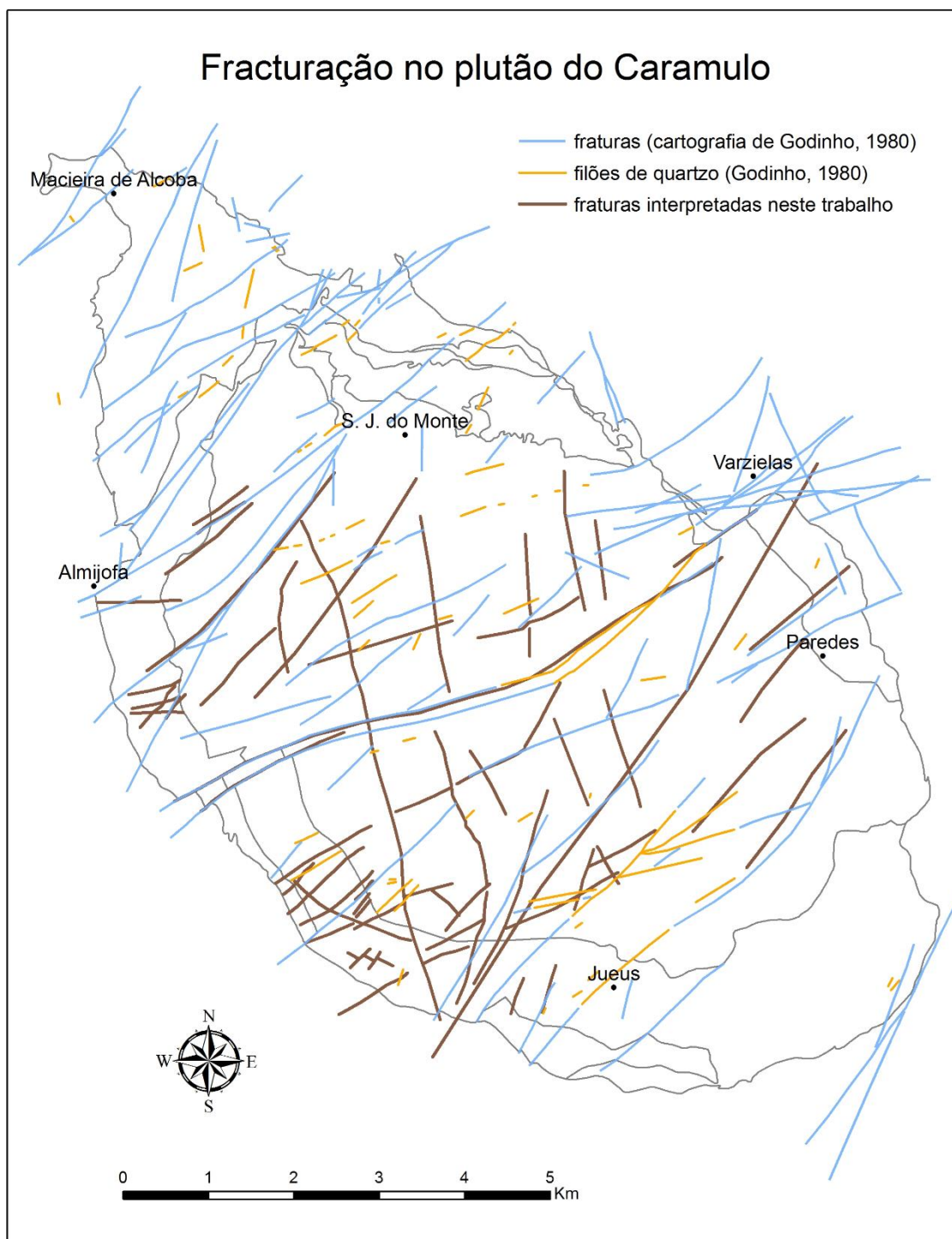


Figura V.2. Fracturação geral marcada sobre imagens aéreas obtidas no *ArcGlobe*. Verificar que as orientações predominantes são NE-SO, ENE-OSO e NNO-SSE.

II.2. Medição das diaclases

Nas rochas graníticas, em afloramento, as diaclases são as estruturas planares mais comuns que caracterizam a forma como os maciços manifestam a fracturação.

As diaclases representam os planos de descontinuidade mais frequentes em maciços rochosos e correspondem a superfícies de fracturação das rochas ao longo das quais não existe deslocamento ou, caso exista, tenha sido muito pequeno. Quanto à sua origem, as diaclases nas rochas ígneas podem ter sido formadas por contração durante ou após a instalação do corpo ígneo e apresentam uma disposição característica em três famílias ortogonais entre si. As diaclases subparalelas à superfície topográfica que se observam na maior parte dos maciços graníticos são interpretadas como resultantes da expansão causada pelo alívio de carga em virtude da remoção pela erosão das rochas sobrejacentes ao plutão (Vallejo, et al. 2002).

Para compreender melhor a fracturação presente no plutão do Caramulo, durante o trabalho de campo foram medidas as atitudes (direção e pendor) das diaclases em afloramentos seleccionados cujo grau de alteração não fosse muito elevado e onde fossem visíveis as principais famílias de diaclases e, por questões de logística, tivessem fácil acesso.

Foram medidas as atitudes das diaclases em oito locais (Tab. V.1 e Fig. V.3) perfazendo um total de 563 planos medidos.

Tabela V.1. Coordenadas cartográficas no Sistema UTM *Datum* WGS84 dos oito locais onde foram medidas as atitudes das diaclases com informação da fácies do granito do Plutão segundo Godinho, 1980.

Local	coordenada X mE	coordenada Y mN	N total diaclases	N pendor ≥70º	fácies do granito (Godinho, 1980)
Matadegas	561679	4495394	30	18	Macieira de Alcôba
Belazaima	562382	4494322	47	27	Almijofa
S. J. Monte	564558	4493843	69	46	Caramulo
Bezerreira	567020	4492852	77	46	Caramulo
Pinoucas	569710	4492530	56	38	Paredes
Dornas	565070	4490590	95	60	Caramulo
AMS-26	567648	4489607	93	57	Caramulo
Cabeço Neve	569506	4489545	96	55	Caramulo

Para cada um dos locais realizou-se a projecção estereográfica das diaclases medidas. A maneira mais comum de apresentar tantos dados é traçando linhas de contorno de igual densidade dos dados projetados estereograficamente. Os dados projetados estereograficamente são os polos dos planos sobre os quais é necessário fazer um tratamento estatístico. Para o efeito deve ser usada uma rede de igual área (rede de Schmidt) e usado o hemisfério inferior. A representação dos dados de

orientação em diagramas de contorno de igual densidade permite a definição das famílias de diaclases presentes em cada um dos locais onde foram medidas, assim como a determinação da sua importância relativa. Cada família representa um conjunto de diaclases com aproximadamente a mesma orientação.

Em alguns casos os dados das atitudes das diaclases foram também projetados e visualizados em histogramas com a frequência da direção (aqui representado com o valor do azimuth). No eixo horizontal estão os valores do azimuth (0° a 180°) das diaclases em intervalos de 10° . No eixo vertical está representado o número de diaclases. Na metade superior do diagrama estão representadas as diaclases com pendores iguais ou superiores a 70° e na metade inferior pendores inferiores a 70° .

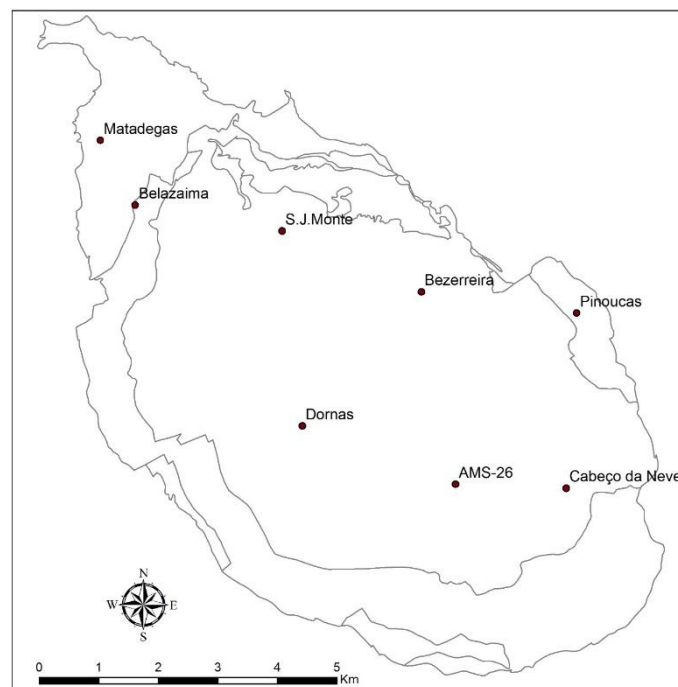


Figura V.3. Localização dos oito locais onde foram medidas as atitudes das diaclases.

O diagrama de rosas é outro método gráfico que apresenta a frequência das orientações das direções dos planos em que os dados são apresentados graficamente com forma circular. Os diagramas de rosas não têm em conta a inclinação dos planos, tendo em consideração somente a direção dos planos. Se os dados a tratar dizem respeito a planos verticais ou subverticais, o diagrama de rosas é um método gráfico que permite visualizar muito rapidamente, e com eficácia, a frequência e a direção preferencial dos planos existentes numa região. Mas se os planos raramente são verticais, ao serem usados diagramas de rosas a informação do pendor dos planos, quer o ângulo de inclinação quer o sentido para o qual inclina o plano, perde-se, podendo na análise destes diagramas resultar uma deficiente interpretação dos dados.

Neste trabalho, para a projeção no diagrama de rosas foram selecionados os planos de diaclases que apresentam pendores iguais ou superiores a 70° (Tab. V.1).

Embora a projeção dos dados possa ser feita manualmente, atualmente existe grande número de *software* disponível gratuitamente facilitando o desempenho e permitindo um tratamento estatístico dos dados mais célere. Para este trabalho foi usado o *software* “*Stereo32 version 1.0.3*”. Uma explicação detalhada das técnicas de projeção estereográfica pode ser encontrada em diversos manuais, como Lisle & Leyshon (2004) e Ragan (2009).

V.2.1. Matadegas

Neste local foi medida a atitude de 30 planos de diaclases (Tab. V.2) numa barreira da estrada municipal CM1513 com cerca de 2 metros de altura.

Após projeção estereográfica dos polos dos planos e respetivo traçado dos contornos das linhas de igual densidade, é possível identificar três famílias de diaclases com atitudes médias N56°E;84SE, N22°E;60°NO e N22°O;69°E (Fig.V.4a). Para além destas, analisando o diagrama de rosas, é possível identificar uma quarta família com atitude aproximada EO; subvertical (Fig. V.4b). A quantidade de medidas feitas neste local (apenas 30) pode contribuir para uma maior dispersão na projeção das diaclases.

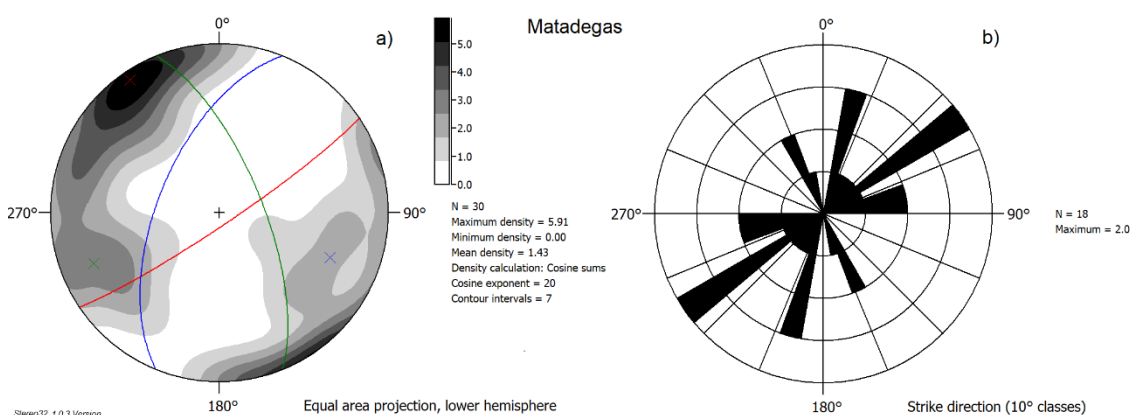


Figura V.4. Diagrama de contornos com indicação das famílias de diaclases (a). Diagrama de rosas destacando as orientações principais das diaclases presentes em Matadegas (b).

V.2.2. Belazaima

Neste local foram medidos 47 planos (Tab. V.2) num afloramento junto à ponte sobre o rio Águeda onde as diaclases são bem visíveis (Fig. V.5).



Figura V.5. Aspeto do afloramento onde foram medidas as atitudes dos planos de diaclases no local Belazaima.

Após projeção estereográfica dos polos dos planos e respetivo traçado dos contornos das linhas de igual densidade, é possível identificar três famílias de diaclases com atitudes médias $N46^{\circ}E;84^{\circ}SE$, $N16^{\circ}O;77^{\circ}E$ e $N60^{\circ}O;34^{\circ}NE$ (Fig.V.6a). A terceira família não é visível no diagrama de rosas porque neste estão projetadas as diaclases com pendores igual ou superiores a 70° (Fig. V.6b).

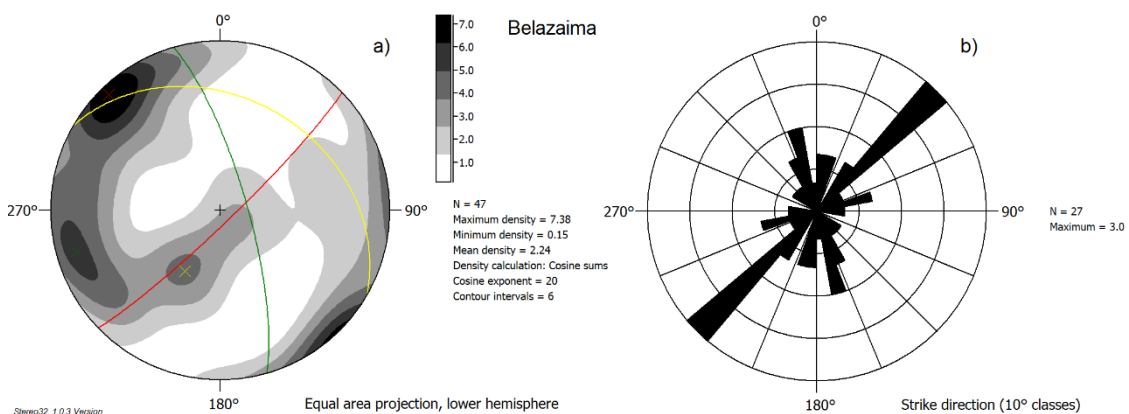


Figura V.6. Diagrama de contornos com indicação das famílias de diaclases (a). Diagrama de rosas destacando as orientações principais das diaclases presentes em Belazaima (b).

V.2.3. S. João do Monte

Neste local foi medida a atitude de 69 planos de diaclases (Tab. V.2) num morro localizado nas traseiras do quartel dos Bombeiros desta povoação.

Após projeção estereográfica dos polos dos planos e respetivo traçado dos contornos das linhas de igual densidade, é possível identificar quatro famílias de diaclases com atitudes médias $N36^{\circ}E;81^{\circ}SE$, $N03^{\circ}E;88^{\circ}E$, $N44^{\circ}O;80^{\circ}NE$ e

N30°E,05°NO (Fig.V.7a). A quarta família não é visível no diagrama de rosas porque neste não estão projetadas as diaclases sub-horizontais (Fig. V.7b).

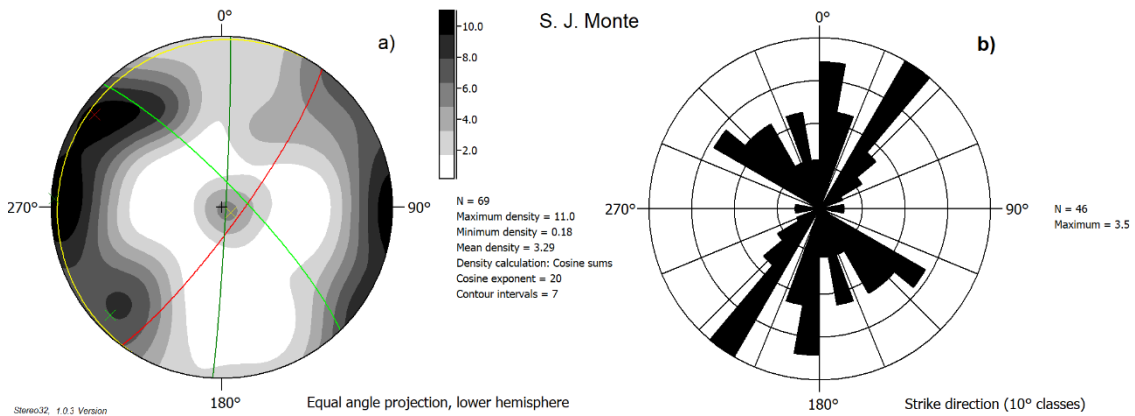


Figura V.7. Diagrama de contornos com indicação das famílias de diaclases (a). Diagrama de rosas destacando as orientações principais das diaclases presentes em S.J.Monte (b).

A figura V.8 é uma imagem aérea do afloramento onde foram medidas estas diaclases. Nela é possível ver duas das famílias de diaclases mais importantes com orientações aproximadas NE-SO e NO-SE subverticais (N36°E;81°SE e N44°O;80°NE) identificáveis pelo seu alinhamento.



Figura V.8. Imagem aérea do afloramento onde foram medidas as diaclases do local S. João do Monte, onde se traçaram algumas como exemplo.

V.2.4. Bezerreira

Neste local foi medida a atitude de 77 planos de diaclases (Tab. V.2) num afloramento junto a um aerogerador de energia elétrica (torre eólica).

Após projeção estereográfica dos polos dos planos e respetivo traçado dos contornos das linhas de igual densidade, é possível identificar duas famílias de diaclases com atitudes médias $N38^{\circ}E;86^{\circ}SE$ e $N43^{\circ}O,61^{\circ}SO$ (Fig.V.9a). A segunda família não é visível no diagrama de rosas porque tem pendor de 61° , ou seja, inferior a 70° (Fig.V.9b). Neste caso em particular, a projeção de todos os planos de diaclases medidos em Bezerreira no diagrama de rosas revela a existência desta segunda família.

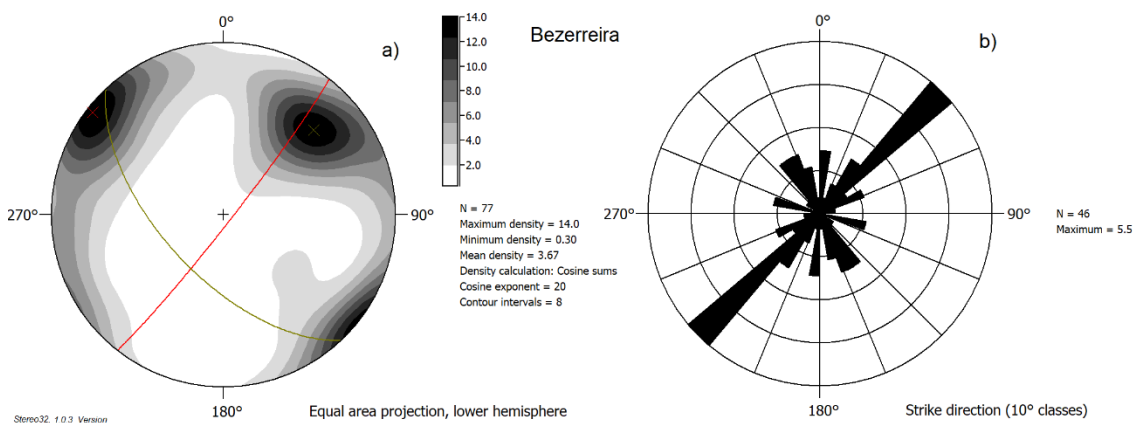


Figura V.9. Diagrama de contornos com indicação das famílias de diaclases (a). Diagrama de rosas destacando as orientações principais das diaclases presentes em Bezerreira (b).

À semelhança do anterior, também aqui a imagem aérea deste local permite identificar duas famílias de diaclases com orientações aproximadas NE-SO e NO-SE.

V.2.5. Pinoucas

Neste local foi medida a atitude de 56 planos de diaclases (Tab. V.2) num afloramento junto ao vértice geodésico Pinoucas.

Após projeção estereográfica dos polos dos planos e respetivo traçado dos contornos das linhas de igual densidade, é possível identificar três famílias de diaclases com atitudes médias $N02^{\circ}E;82^{\circ}O$, $N54^{\circ}O,86^{\circ}SO$ e outra Sub-Horizontal (Fig.V.10a). No diagrama de rosas a família de planos de diaclases sub-horizontal não está projetada. (Fig.V.10b).

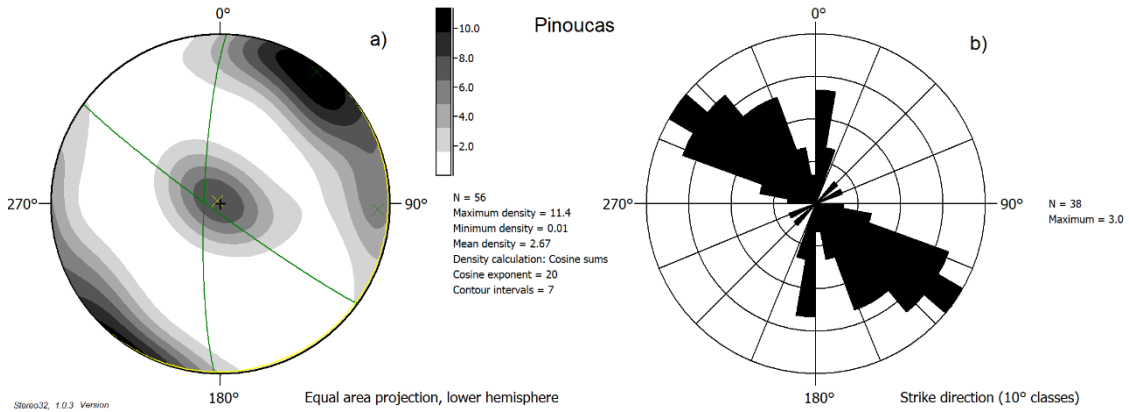


Figura V.10. Diagrama de contornos com indicação das famílias de diaclases (a). Diagrama de rosas destacando as orientações principais das diaclases presentes em Pinoucas (b).

V.2.6. Dornas

Neste local foi medida a atitude de 95 planos de diaclases (Tab. V.2) num talude da estrada municipal CM1510 e afloramentos contíguos junto à povoação de Dornas.

Após projeção estereográfica dos polos dos planos e respetivo traçado dos contornos das linhas de igual densidade, é possível identificar três famílias de diaclases com atitudes médias N48°E;84°SE, N31°O;83°NE e EO;10°N (Fig.V.11a). No diagrama de rosas a terceira família não está projetada. (Fig.V.11b).

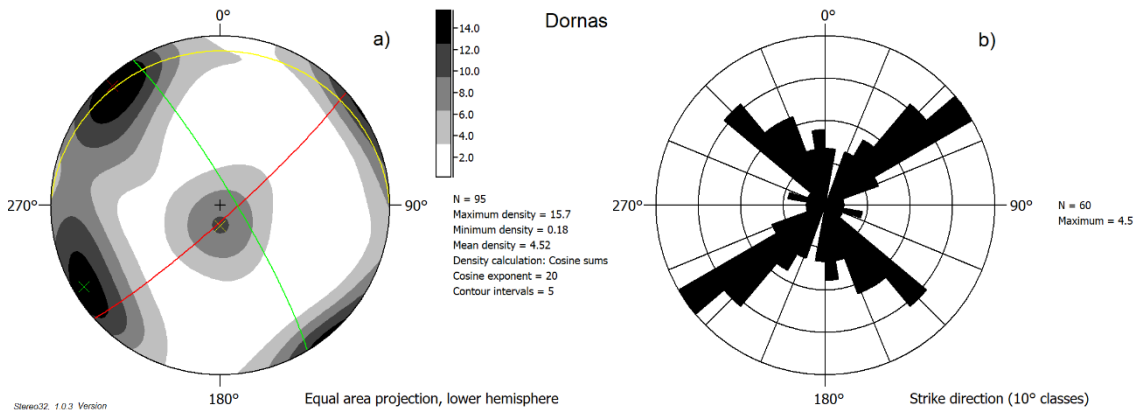


Figura V.11. Diagrama de contornos com indicação das famílias de diaclases (a). Diagrama de rosas destacando as orientações principais das diaclases presentes em Dornas (b).

A figura V.12 é uma imagem aérea do local onde foram medidas estas diaclases. Nela é possível ver duas das famílias de diaclases mais importantes com orientações aproximadas NE-SO e NO-SE subverticais identificáveis pelo seu alinhamento.



Figura V.12. Imagem aérea do afloramento onde foram medidas as diaclases do local Dornas, onde se traçaram algumas como exemplo.

V.2.7. AMS-26

Neste local foi medida a atitude de 93 planos de diaclases (Tab. V.2) em afloramentos contíguos a ambos os lados da estrada municipal CM1510.

Após projeção estereográfica dos polos dos planos e respetivo traçado dos contornos das linhas de igual densidade, é possível identificar três famílias de diaclases com atitudes médias $N34^{\circ}O;85^{\circ}NE$, $N57^{\circ}E;88^{\circ}NO$ e $N56^{\circ}O;06^{\circ}SO$ (Fig.V.13a). No diagrama de rosas a terceira família não está projetada. (Fig.V.13b).

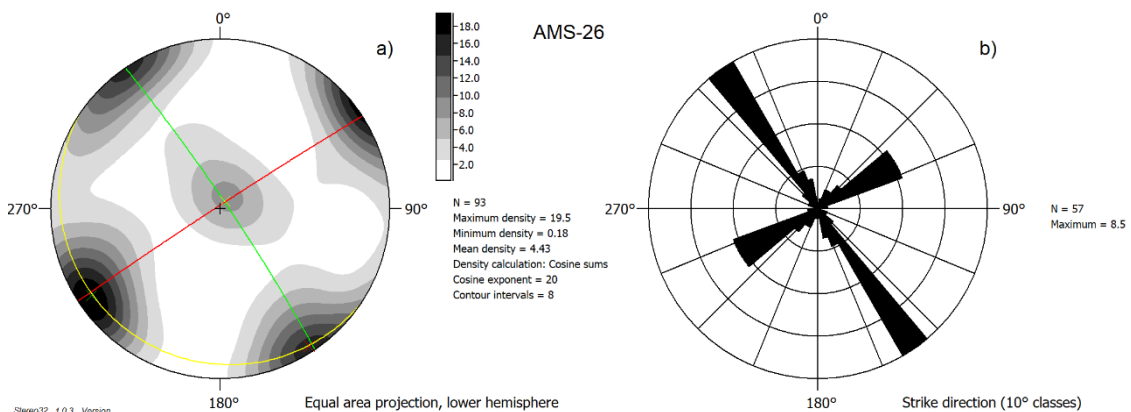


Figura V.13. Diagrama de contornos com indicação das famílias de diaclases (a). Diagrama de rosas destacando as orientações principais das diaclases presentes em AMS-26 (b).

O histograma com a frequência da direção mostra haver maior número de diaclases com orientação NO-SE (Fig.V.14) podendo deste modo explicar o tamanho maior da pétala do diagrama de rosas com esta direção (Fig. 13b). Este histograma apresenta no eixo horizontal os valores do azimute (0 a 180°) das diaclases em intervalos de 10 graus e no eixo vertical está representado o número de diaclases. Na metade superior do diagrama estão representadas as diaclases com pendores iguais ou superiores a 70° e na metade inferior pendores inferiores a 70°.

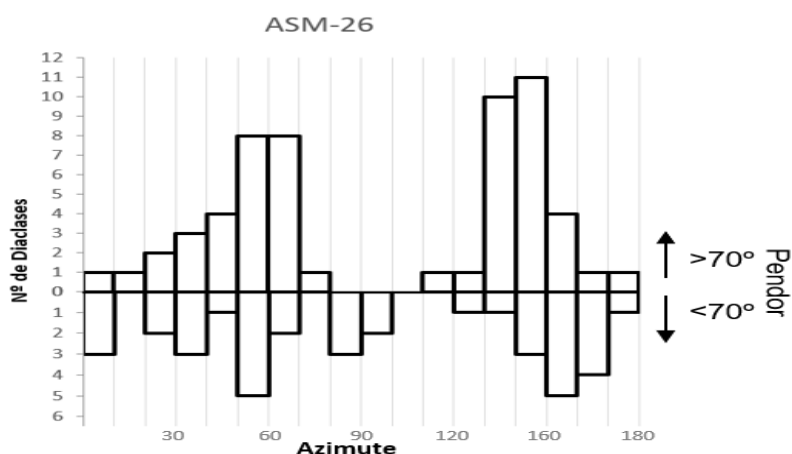


Figura V.14. histogramas com a frequência da direção (aqui representado com o valor do azimute) respeitante ao local AMS-26.

V.2.8. Cabeço da Neve

Neste local foi medida a atitude de 96 planos de diaclases (Tab. V.2) em afloramentos contíguos ao miradouro do Cabeço da Neve.

Após projeção estereográfica dos polos dos planos e respetivo traçado dos contornos das linhas de igual densidade, é possível identificar três famílias de diaclases com atitudes médias N48°E;Vertical, N24°O;56°SO e N14°O;20°NE (Fig.V.15a). No diagrama de rosas a segunda e terceira famílias não se encontram visíveis porque não estão projetadas as diaclases com pendores inferiores a 70° (Fig. V.15b). Apesar disso na imagem aérea são visíveis a primeira e a segunda família (Fig. 16).

IV.3. Interpretação

Após análise dos estereogramas e diagramas de rosas obtidos nos oito locais já descritos conclui-se que existem principalmente duas grandes famílias de diaclases com orientações NO-SE e NE-SO subverticais e uma terceira grande família com pendores sub-horizontais (Fig. V.17).

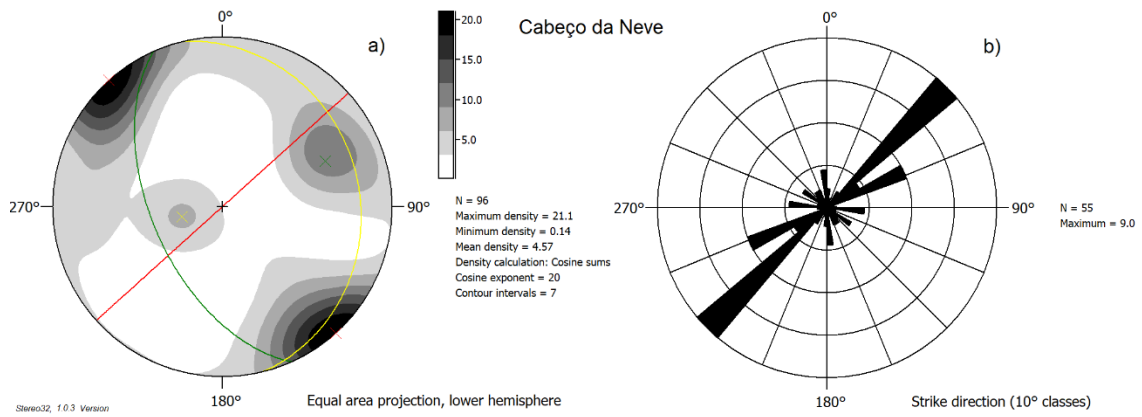


Figura V.15. Diagrama de contornos com indicação das famílias de diaclases (a). Diagrama de rosas destacando as orientações principais das diaclases presentes em Cabeço da Neve (b).



Figura V.16. Imagem aérea do afloramento onde foram medidas as diaclases do local Cabeço da Neve, onde se traçaram algumas como exemplo.

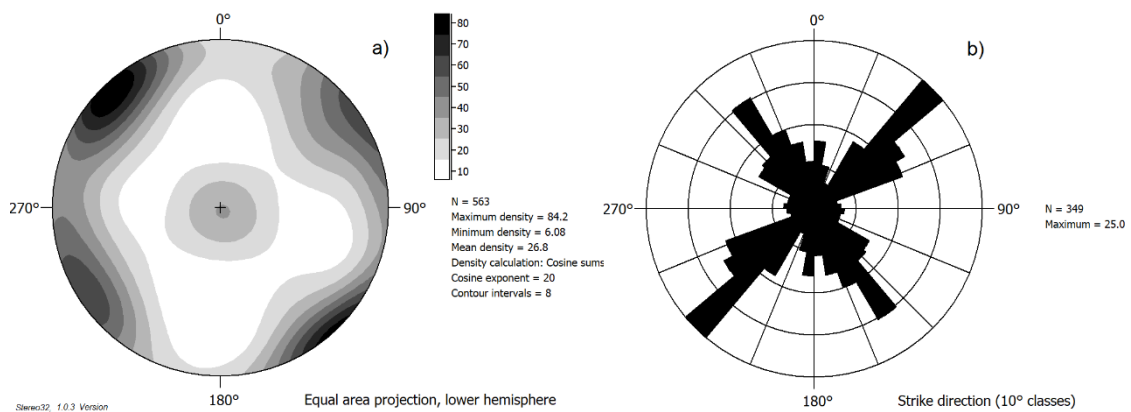


Figura V.17. Diagrama de contornos de todos os planos de diaclase medidos (a). Diagrama de rosas de todas as diaclases com pendores iguais ou superior a 70° (b).

O padrão de diaclasamento não é perfeitamente concordante com a fracturação presente no Plutão do Caramulo, embora as orientações gerais das duas famílias de diaclases subverticais encontradas não diferem muito (Fig. V.18).

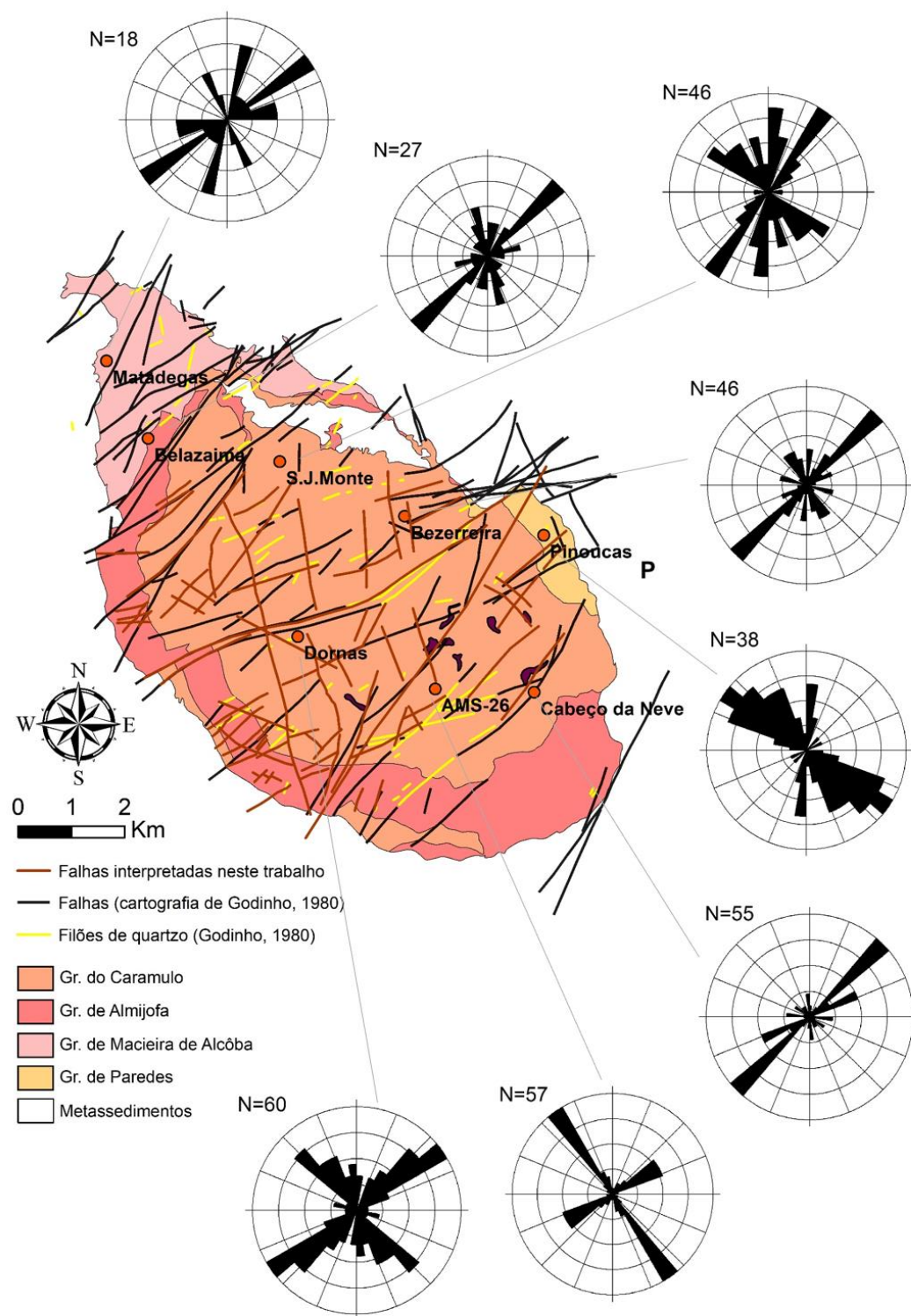


Figura V.18. Mapa do plutão do Caramulo com a fracturação e diagramas de rosas referentes a cada um dos locais onde foi medida a atitude das diaclases existentes.

CAPÍTULO VI

CONCLUSÕES

O granito do Caramulo aflora na região centro-norte de Portugal, no sector ocidental da Zona Centro-Ibérica (ZCI), no domínio das dobras com vergência para SO. É um plutão com forma ligeiramente elíptica, alongado de acordo com as estruturas variscas desta região (NO-SE) e considerado sintectónico com a 3ª fase de deformação (D_3). Constituem o plutão granitos de grão variável, de médio a fino, todos eles de duas micas, com predomínio da moscovite sobre a biotite. O maciço foi estudado em detalhe por Godinho (1980) que cartografou 4 fácies principais, cuja disposição no terreno mostra um plutão com um zonamento petrográfico concêntrico (Fig. II. 8).

O plutão corta as isógradas do metamorfismo regional e, do ponto de vista estrutural, caracteriza-se pela ausência generalizada de critérios macro- ou microscópicos identificadores de deformação no estado sólido. Estes aspetos apontam para que a implantação do granito no nível crustal onde consolidou tenha sido bastante tardia na evolução do orógeno, em particular em relação à D_3 .

É neste tipo de rochas, com anisotropia inexistente ou muito baixa, onde os métodos tradicionais para a aquisição de dados de orientação não são fáceis de usar, que a técnica da Anisotropia da Suscetibilidade Magnética se torna muito útil, permitindo caracterizar a estrutura interna dos maciços e, em consequência, proporcionar informação sobre o padrão do fluxo magmático. Com efeito, a orientação do elipsoide de ASM depende dos minerais responsáveis pelo magnetismo induzido. Existe, por isso uma correlação entre a foliação magnética e a foliação conferida pela orientação preferencial das biotites (foliação magmática ou tectónica), assim como entre a lineação magnética (eixo maior do elipsoide de ASM, K_1) e a lineação mineral das rochas.

Do estudo da suscetibilidade magnética e da sua anisotropia levado a cabo no plutão do Caramulo, podem ser tiradas as seguintes conclusões:

- A suscetibilidade magnética (K_m) dos granitos das várias fácies que formam o maciço é bastante baixa, entre $2,1 \times 10^{-5}$ e $9,0 \times 10^{-5}$ SI (Fig. IV.1), sendo que na

maior parte das amostras os valores medidos foram inferiores a $6,0 \times 10^{-5}$ SI, o que reflete a abundância de moscovite em detrimento da biotite.

- A distribuição dos valores de Km no plutão não reflete o carácter zonado do plutão. No entanto, existe uma correlação razoavelmente boa entre as zonas onde a suscetibilidade é maior (sector ocupado pela fácies de Paredes e na transição entre a fácies principal do Caramulo e a de Almijofa) e a % de biotite das amostras estudadas por Godinho é mais alta (1980) (Fig. IV.2).
- As rochas possuem uma anisotropia baixa ($2,1\% < P\% < 9,0\%$) e a maior parte do plutão apresenta valores de P% inferiores a 4% (Fig. IV.3). Este baixo grau de anisotropia é típico de granitos onde predominam os “fabrics” magmáticos.
- Os granitos mais anisotrópicos situam-se na periferia do maciço, sobretudo nas proximidades do contacto nordeste (Fig. IV.3). Em linhas gerais coincidem com as zonas onde a suscetibilidade e a % de biotite são mais altas, pelo que a maior abundância deste mineral poderá estar a facilitar uma melhor definição do “fabric”.
- Face à correlação entre o elipsoide de suscetibilidade magnética e o “fabric” mineral e tendo em conta a fraca ou inexistente deformação no estado sólido do granito do Caramulo, a foliação e a lineação magnéticas devem corresponder, respetivamente, à foliação e lineação magmáticas. Ou seja, os dados de ASM obtidos devem refletir o padrão do fluxo magmático aquando a instalação do corpo intrusivo.
- O padrão definido pela orientação da foliação sugere que o fluxo magmático ter-se-á processado paralelamente aos contactos com os metassedimentos encaixantes (Fig. IV.7).
- A lineação magnética/magmática apresenta inclinações bastante baixas em numerosos locais com uma direção claramente dominante segundo NO-SE (Fig. IV.7). Duas estações na metade sul do maciço, onde a lineação é praticamente vertical, possivelmente assinalam a posição de canais de alimentação da câmara magmática durante a instalação do granito.
- A informação recolhida aponta para a influência da deformação regional aquando da instalação do magma granítico. Com efeito, a forma alongada do plutão e a direção dominante da lineação, paralelas às estruturas variscas da D₃, sugerem que a instalação do granito e o fluxo do magmático estiveram controlados tectonicamente por esta fase de deformação. No entanto, a D₃ já deveria ter acabado quando o magma granítico atingiu o nível crustal onde consolidou.

No que respeita à fracturação, após análise dos estereogramas e diagramas de rosas obtidos nos oito locais onde a atitude das diaclases foram medidas, conclui-se que existem principalmente duas grandes famílias com orientações NO-SE e NE-SO subverticais e uma terceira grande família com pendores sub-horizontais. O padrão de diaclasamento não é perfeitamente concordante com a fracturação presente no Plutão do Caramulo, embora as orientações gerais das duas famílias de diaclases subverticais encontradas não diferem muito.

BIBLIOGRAFIA

- Amice, M. & Bouchez, J.L. (1989). Susceptibilité magnétique et zonation du batholite de Cabeza de Araya (Extremadura, Espagne). *C. R. Acad. Sci. Paris*, 308(II): 1171-1178.
- Aranguren, A & Tubia, J. M. (1994). Características estruturales y modelo de emplazamiento del plutón de Guitiriz (Galicia). *Rev. Soc. Geol. de España*, 7 (1-2): 63-73.
- Arthaud, F. & Matte P. (1975). Les décrochements tardi-hercyniens du sud ouest de l'Europe. Géometrie et essai de reconstruction des conditions de la déformation. *Tectonophysics* 25: 139-171.
- Ávila Martins, J. (1962). Contribuição para o conhecimento geológico da Região do Caramulo. *Junta de Energia Nuclear, Memória* 35: 123-227.
- Azevedo, M.R. & Valle Aguado, B. (2013). Origem e instalação de granitóides variscos na Zona Centro-Ibérica. In: Dias, R., Araújo, A., Terrinha, P. e Kullberg, J.C. (Eds.). *Geologia de Portugal, Volume I - Geologia Pré-mesozóica de Portugal*. Escolar Editora: 377-401.
- Bernardo de Sousa, M. (1984). Considerações paleogeográficas sobre a estratigrafia do Complexo Xisto-Grauváquico (CXG) e sua relação com o Paleozóico Inferior. *Cuad. Geol. Ibérica*, 9: 9-36.
- Bernardo de Sousa, M. (1985). Perspectiva sobre os conhecimentos actuais do Complexo Xisto-Grauváquico de Portugal. *Mem. Not. Mus. Lab. Min. Geol. Univ. Coimbra*, 100: 1-16.
- Borradaile, G.J. & Henry, B. (1997). Tectonic applications of magnetic susceptibility and its anisotropy. *Earth Sci. Rev.* 42: 49-93.
- Bouchez, J.L. (1997). Granite is never isotropic: an introduction to AMS studies of granitic rocks. In: Bouchez, J.L.; Hutton, D.H.W.; Stephens, W.E. (Eds.), *Granite: From segregation of Melt to Emplacement Fabrics*. Kluwer Academic Publishers: 95-112.
- Bouchez, J.L. (2000). Anisotropie de susceptibilité magnétique et fabrique des granites. *C. R. Acad. Sci. Paris*, 330(II): 1-14.
- Bouchez, J.L. (2002). Magnetic susceptibility anisotropy and fabrics in granites. *Earth and Planetary Science Letters*, 330: 1-14.
- Carta Geológica de Portugal, Escala 1:500000 (1992). Coordenadores: Oliveira, T., Pereira, E., Ramalho, M., Antunes, M.T. & Monteiro, J.H. Edição dos Serviços Geológicos de Portugal.
- Chadima, M. & Jelinek, V. (2009). Anisoft 4.2: Anisotropy Data Browser for Windows. Agico. Inc, Brno.
- Dallmeyer, R.D., Martínez Catalán, J.R., Arenas, R., Gil Ibarguchi, J.I., Gutiérrez Alonso, G., Farias, P., Bastida, F. & Aller, J. (1997). Diachronous Variscan tectonothermal activity in the NW Iberian Massif: Evidence from $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of regional fabrics. *Tectonophysics* 277: 307-337.
- Dias, R. & Ribeiro, A. (1995). The Ibero-Armorican Arc: A collision effect against an irregular continent? *Tectonophysics*, 246: 113-128.

- Dias, R., Ribeiro, A., Coke, C., Pereira, E., Rodrigues, J., Castro, P., Moreira, N. & Rebelo, J. (2013). Evolução estrutural dos sectores setentrionais do autóctone da Zona Centro-Ibérica. In: Dias, R., Araújo, A., Terrinha, P., Kullberg, J.C. (Eds.), *Geologia de Portugal, Volume I - Geologia Pré-mesozóica de Portugal*, Escolar Editora: 73–147.
- Díez Balda, M.A., Vegas, R. & González Lodeiro, F. (1990). Central Iberian Zone: Structure. In: Dallmeyer, R.D. & Martínez García, E. (Eds). *Pre-Mesozoic Geology of Iberia*. Springer, Berlin Heidelberg: 172-188.
- Dubey, A.K. (2014). Anisotropy of Magnetic Susceptibility. In: *Understanding an Orogenic Belt*. Springer Ed.: 17- 31.
- Escuder Viruete, J., Arenas, R. & Martínez Catalán, J.R. (1994). Tectonothermal evolution associated with Variscan crustal extension in the Tormes Gneiss Dome (NW Salamanca, Iberian Massif, Spain). *Tectonophysics*, 238: 117-138.
- Escuder Viruete, J., Hernáiz Huerta, P.P., Valverde Vaquero, P., Rodríguez Fernández, R. & Dunning, G. (1998). Variscan syncollisional extension in the Iberian Massif: structural, metamorphic and geochronological evidence from the Somosierra sector of the Sierra de Guadarrama (Central Iberian Zone, Spain). *Tectonophysics* 290: 87-109.
- Ferreira, N., Iglesias Ponce de León, M., Noronha, F., Ribeiro, A. & Ribeiro, M.L. (1987). Granitóides da Zona Centro Ibérica e seu enquadramento geodinâmico. In: Bea, F., Carnicero, A., Gonzalo, J.C., López Plaza, M. & Rodriguez Alonso, M.D. (Eds.) *Geología de los Granitoides e Rocas Asociadas del Macizo Hespérico*, Editorial Rueda, Madrid, 37-51.
- Gébelin, A., Martelet, G., Chenc, Y., Brunel, M. & Faure, M. (2006). Structure of late Variscan Millevaches leucogranite massif in the French Massif Central: AMS and gravity modelling results. *J. Struct. Geol.* 28: 148–169.
- Gleizes, G., Leblanc, D. & Bouchez, J.L. (1991). Le pluton granitique de Bassiès (Pyrénées ariégeoises): zonation, structure et mise en place. *C. R. Acad. Sci. Paris*, 312(II): 755-762.
- Gleizes, G., Nédélec, A., Bouchez, J.L., Autran, A. & Rochette, P. (1993). Magnetic susceptibility of the Mont-Louis Andorra ilmenite-type granite (Pyrenees): a new tool for the petrographic characterization and regional mapping of zoned granite plutons. *J. Geophys. Res.*, 98, B3: 4317-4331.
- Godinho, M.M. (1974). Sobre o plutonometamorfismo da região de Guardão (Caramulo, Portugal). *Mem. Not. Publ. Mus. Lab. Min. Geol. Univ. Coimbra*, 78: 37-77.
- Godinho, M.M. (1980). O plutonito do Caramulo. *Mem. Not. Publ. Mus. Lab. Min. Geol. Univ. Coimbra*, 89-90, 269 pp.
- Gomes, C. & Sant’Ovaia, H., (2015). Modelos de anisotropia da suscetibilidade magnética versus modelação de processos geológicos. In: Neves, L.J.P.F., Pereira, A.J.S.C., Gomes, C.S.R, Pereira, L.C.G. & Tavares, A.O. (Eds.). *Modelação de sistemas geológicos: livro de homenagem ao Professor Manuel Maria Godinho*: 237-246.
- Jelinek, V. (1981). Characterization of the magnetic fabric of rocks. *Tectonophysics* 79: 563-567
- Julivert, M., Fontboté, J.M., Ribeiro, A. & Conde, L.N. (1974). *Memória Explicativa del Mapa Tectónico de la Península Ibérica y Baleares* (E. 1:1000000). IGME, 113 pp.
- Lisle, R.J. & Leyshon, P.R. (2004). *Stereographic Projection Techniques for Geologists and Civil Engineers*. Cambridge University Press, UK, 112 pp.
- Marques, F., Mateus, A. & Tassinari, C. (2002). The late-Variscan fault network in central-northern Portugal (NW Iberia): a re-evaluation. *Tectonophysics*, 359: 255-270.
- Martínez Catalán, J. R. (2012). The Central Iberian arc, an orocline centered in the Iberian Massif and some implications for the Variscan belt. *Int. Journ. Earth Sci*, 101: 1299–1314.
- Martínez Catalán, J.R., Martínez Poyatos, D. & Bea, F. (2004). Zona Centroibérica. Introducción. In: Vera, J.A. (Eds.), *Geología de España*. SGE-IGME, Madrid, pp. 68-69.
- Martínez, F.J., Julivert, M., Sebastian, A., Arboleya, M.L. & Gil Ibarguchi, J.I. (1988). Structural and thermal evolution of high grade areas in the northwestern parts of the Iberian Massif. *Am. J. Sci.*, 288: 969-996.

- Medina, J. (1996). Contribuição para o conhecimento da geologia do Grupo das Beiras na região do Caramulo-Buçaco (Portugal Central). Tese de Doutoramento, Universidade de Aveiro, 202 pp.
- Mellado, D., Álvarez Lobato, F. & Yenes, M. (2006). Estructura magnética del plutón de Villavieja de Yeltes (Salamanca). *Rev. Soc. Geol. de España*, 19 (1-2): 43-58.
- Noronha, F., Ribeiro, M.A., Almeida, A., Dória, A., Guedes, A., Lima, A., Martins, H.C., Sant'Ovaia, H., Nogueira, P., Martins, T., Ramos, R & Vieira, R. (2013). Jazigos Filonianos Hidrotermais e Aplitopegmatíticos Espacialmente Associados a Granitos (Norte de Portugal). In: Dias, R., Araújo, A., Terrinha, P. e Kullberg, J.C. (Eds.). *Geologia de Portugal, Volume I - Geologia Pré-mesozóica de Portugal*. Escolar Editora: 403-438.
- Oen, I.S. (1970). Granite intrusion, folding and metamorphism in Central Northern Portugal. *Bol. Geol. Min. España*, 81, 271-298.
- Pérez-Estaún, A., Bea, F., Bastida, F., Marcos, A., Martínez Catalán, J.R., Martínez Poyatos, D., Arenas, R., Díaz García, F., Azor, A., Simancas, J.F. & González Lodeiro, F. (2004). La cordillera varisca europea: el Macizo Ibérico. In: Vera, J.A. (Ed). *Geología de España*. SGE-IGME, Madrid, 21-25.
- Ragan, D.M. (2009). *Structural Geology: An Introduction to Geometrical Techniques*. Cambridge University Press. 624 pp.
- Ribeiro, A., Conde, L. e Monteiro, J. (1972): "Carta tectónica de Portugal, escala 1:1000.000". *Direcção Geral de Minas e Serviços Geológicos, Lisboa*.
- Ribeiro, A., Antunes, M.T., Ferreira, M.P., Rocha, R.B., Soares, A.F., Zbyszewski, G., Moitinho de Almeida, J.H., Carvalho, D. & Monteiro, J.H. (1979). Introduction a la Géologie Générale du Portugal. *Serv. Geol. Portugal, Lisboa*, 114 pp.
- Rodríguez Alonso, M.D., Díez Balda, M.A., Perejón, A., Pieren, A., Liñán E., López Díaz, F., Moreno, F., Gámez Vintaned, J.A., González Lodeiro, F., Martínez Poyatos, D. & Vegas, R. (2004). Dominio del Complejo Esquisto-Grauváquico: Estratigrafía. In: Vera, J.A. (Ed). *Geología de España*. SGE-IGME, Madrid, 78-81.
- Román-Berdiel, T., Casas, A.M., Oliva-Urcia, B., Pueyo, E.L., Liesa, C. & Soto, R. (2006). The Variscan Millares granite (central Pyrenees): Pluton emplacement in a T fracture of a dextral shear zone. *Geodinamica Acta* 19/3-4: 197-211.
- Sant'Ovaia, H., Olivier, Ph., Ferreira, N., Noronha, F. & Leblanc, D. (2010). Magmatic structures and kinematics emplacement of the Variscan granites from Central Portugal (Serra da Estrela and Castro Daire areas). *J. Struct. Geol.* 32: 1450-1465.
- Tassinari, C.C.G., Medina, J. & Pinto, M.S. (1996). Rb-Sr and Sm-Nd geochronology and isotope geochemistry of Central Iberian metasedimentary rocks (Portugal). *Geolog. en Mijnbouw*, 75: 69-79.
- Valle Aguado, B., Azevedo, M.R., Nolan J., Medina, J., Costa M.M., Corfú, F. & Martínez Catalán J.R. (2017). Granite emplacement at the termination of a major Variscan transcurrent shear zone: The late collisional Viseu batholith. *J. Struct. Geol.* 98: 15-37.
- Valle Aguado, B., Azevedo, M.R., Schaltegger, U., Martínez Catalán, J.R. & Nolan, J. (2005). U-Pb zircon and monazite of Variscan magmatism related to syn-convergence extension in central northern Portugal. *Lithos*, 82, 169-184.
- Vallejo, L. I. G., Ferrer M., Ortuño L., Oteo, C., (2002) – *Ingeniería Geológica*. Pearson Educación, Madrid; ISBN: 84-205-3104-9; 744 pp.
- Yenes, M., Álvarez, F. & Gutiérrez-Alonso, G. (1999). Granite emplacement in orogenic compressional conditions: the La Alberca- Béjar granitic area (Spanish Central System, Variscan Iberian Belt). *J. Struct. Geol.* 21: 1419-1440.

ANEXO 1

Coordenadas, referência e orientação das amostras (azimute e inclinação), dimensões e volume das subamostras.

Coord. UTM WGS84		Estação	Fácies	Amostra	Azim. (°)	Incl. (°)	Subamostra	Diâmetro (cm)	Altura (cm)	Volume (cm³)
X	Y									
564666	4495795	CRML-1	Macieira de Alcôba	CR1	13	19	CR1A	2,46	1,98	9,41
							CR1B	2,46	1,84	8,75
				CR2	330	27	CR2A	2,46	1,96	9,32
							CR2B	2,44	2,02	9,45
							CR2C	2,45	1,96	9,24
				CR3	99	58	CR3A	2,44	1,98	9,26
							CR3B	2,42	1,89	8,69
							CR4A	2,42	1,85	8,51
				CR4	87	88	CR4B	2,45	2	9,43
							CR4C	2,42	1,88	8,65
				CR5	81	84	CR5A	2,42	1,98	9,11
							CR5B	2,43	2,08	9,65
							CR5C	2,46	2,17	10,31
563366	4496225	CRML-2	Macieira de Alcôba	CR6	37	51	CR6A	2,39	2,17	9,74
							CR6B	2,34	2,16	9,29
				CR7	1	51	CR7A	2,37	2,18	9,62
							CR7B	2,39	2,15	9,65
				CR8	107	52	CR8A	2,37	2,17	9,57
							CR8B	2,36	2,16	9,45
				CR9	199	50	CR9A	2,44	2,16	10,10
							CR9B	2,45	2,14	10,09
562458	4496500	CRML-3	Macieira de Alcôba	CR10	29	66	CR10A	2,39	2,12	9,51
							CR10B	2,44	2,14	10,01
				CR11	317	50	CR11A	2,36	2,13	9,32
							CR11B	2,47	2,14	10,25
							CR11C	2,44	2,13	9,96
				CR12	235	74	CR12A	2,42	2,14	9,84
							CR12B	2,44	2,14	10,01
				CR13	83	42	CR13A	2,42	2,14	9,84
							CR13B	2,42	2,16	9,94
				CR14	141	52	CR14A	2,42	2,15	9,89
							CR14B	2,39	2,16	9,69
563439	4493948	CRML-4	Caramulo	CR15	185	72	CR15A	2,44	2,1	9,82
							CR15B	2,42	1,99	9,15
				CR16	119	61	CR16A	2,42	2,17	9,98
							CR17A	2,41	2	9,12
				CR17	45	46	CR17A	2,41	2	9,12
							CR18A	2,44	2,12	9,91
562626	4491460	CRML-5	Caramulo	CR18	9	27	CR18B	2,41	2,2	10,04
							CR19A	2,41	2,19	9,99
				CR19	239	37	CR19B	2,41	2,15	9,81
							CR20A	2,44	2,17	10,15
				CR20	29	43	CR20B	2,45	2,19	10,32
							CR21A	2,41	2,15	9,81
				CR21	73	37	CR21B	2,42	1,99	9,15
							CR22A	2,44	2,16	10,10
				CR22	167	46	CR22A	2,44	2,16	10,10
							CR23A	2,44	2,18	10,19
562850	4489822	CRML-6	Caramulo	CR24	7	35	CR24A	2,42	2,17	9,98
							CR24B	2,41	2,19	9,99
				CR25	339	63	CR25A	2,42	2,16	9,94
							CR25B	2,42	2,13	9,80
				CR26	121	49	CR26A	2,42	2,14	9,84
							CR27A	2,41	2,17	9,90
				CR27	239	75	CR27A	2,41	2,17	9,90
							CR27B	2,42	2,09	9,61

Coord. UTM WGS84		Estação	Fácies	Amostra	Azim. (°)	Incl. (°)	Subamostra	Diâmetro (cm)	Altura (cm)	Volume (cm³)
X	Y									
569503	4489546	CRML-7	Caramulo	CR28	109	80	CR28A	2,4	2,15	9,73
							CR28B	2,42	2,13	9,80
							CR28C	2,42	2,13	9,80
				CR29	265	50	CR29A	2,44	2,11	9,87
							CR29B	2,45	2,18	10,28
							CR29C	2,45	2,11	9,95
				CR30	69	53	CR30A	2,44	2,24	10,47
							CR30B	2,44	2,16	10,10
				CR31	255	22	CR31A	2,44	2,14	10,01
							CR31B	2,42	2,14	9,84
CR32	311	16	CR32A	2,42	2,16	9,94				
			CR32B	2,44	2,2	10,29				
561428	4493479	CRML-8	Madeira de Alcôba	CR33	294	32	CR33A	2,45	2,17	10,23
							CR33B	2,45	2,14	10,09
				CR34	312	30	CR34A	2,44	2,17	10,15
							CR34B	2,44	2,24	10,47
				CR35	101	43	CR35A	2,44	2,28	10,66
							CR35B	2,44	2,18	10,19
				CR36	131	60	CR36A	2,44	2,24	10,47
564619	4491705	CRML-9	Caramulo	CR37	235	14	CR37A	2,47	2,29	10,97
							CR37B	2,44	2,21	10,33
				CR38	247	17	CR38A	2,44	2,22	10,38
				CR39	24	69	CR39A	2,44	2,16	10,10
							CR39B	2,44	2,24	10,47
565090	4489385	CRML-10	Caramulo	CR40	174	56	CR40A	24	2,14	968,12
							CR40B	2,44	2,23	10,43
				CR41	57	27	CR41A	2,44	2,16	10,10
							CR41B	2,44	2,12	9,91
							CR41C	2,42	2,2	10,12
CR42	139	23	CR42A	2,45	2,14	10,09				
			CR42B	2,42	2,14	9,84				
565830	4487858	CRML-11	Almijofa	CR43	227	63	CR43A	2,42	2,17	9,98
							CR43B	2,42	2,13	9,80
				CR44	175	65	CR44A	2,44	2,16	10,10
							CR44B	2,42	2	9,20
							CR44C	2,44	2,18	10,19
CR45	355	16	CR45A	2,46	2,22	10,55				
			CR45B	2,42	2,11	9,71				
			CR45C	2,41	2,12	9,67				
CR46	115	29	CR46A	2,42	2,14	9,84				
			CR46B	2,42	2,24	10,30				
567358	4488795	CRML-12	Caramulo	CR47	50	27	CR47A	2,44	2,23	10,43
							CR47B	2,44	2,12	9,91
							CR47C	2,39	2,01	9,02
				CR48	287	65	CR48A	2,44	2,19	10,24
							CR48B	2,44	2,16	10,10
							CR48C	2,42	2,1	9,66
CR49	137	49	CR49A	2,41	2,13	9,72				
			CR49B	2,41	1,84	8,39				
			CR49C	2,41	2,14	9,76				
CR50	17	62	CR50A	2,42	2,12	9,75				
			CR50B	2,42	2,15	9,89				

Coord. UTM WGS84		Estação	Fácies	Amostra	Azim. (°)	Incl. (°)	Subamostra	Diâmetro (cm)	Altura (cm)	Volume (cm³)
X	Y									
566132	4493866	CRML-13	Caramulo	CR51	193	37	CR51A	2,42	2,18	10,03
							CR51B	2,44	1,99	9,31
				CR52	339	73	CR52A	2,44	2,13	9,96
							CR52B	2,45	2,13	10,04
				CR53	55	33	CR53A	2,44	2,16	10,10
							CR53B	2,44	2,05	9,59
				CR54	155	50	CR54A	2,44	2,13	9,96
							CR54B	2,44	2,14	10,01
567672	4491687	CRML-14	Caramulo	CR55	11	43	CR55A	2,44	2,18	10,19
							CR55B	2,44	2,14	10,01
				CR56	105	50	CR56A	2,45	2,03	9,57
							CR56B	2,47	2,21	10,59
							CR56C	2,47	2,13	10,21
				CR57	205	50	CR57A	2,44	2,14	10,01
							CR57B	2,45	2,21	10,42
569714	4492531	CRML-15	Paredes	CR58	1	42	CR58A	2,45	2,16	10,18
							CR58B	2,45	2,13	10,04
				CR59	64	49	CR59A	2,44	2,1	9,82
							CR59B	2,46	2,1	9,98
				CR60	199	51	CR60A	2,46	2,16	10,27
							CR60B	2,46	2,14	10,17
570901	4488062	CRML-16	Almijofa	CR61	31	10	CR61A	2,45	2,17	10,23
				CR62	101	1	CR62A	2,46	2,17	10,31
							CR62B	2,45	2,19	10,32
570782	4488144			CR63	45	27	CR63A	2,44	2,16	10,10
562382	4494322	CRML-17	Almijofa	CR64	343	12	CR64A	2,42	2,13	9,80
							CR64B	2,43	1,99	9,23
				CR65	38	8	CR65A	2,42	2,17	9,98
							CR65B	2,42	2,05	9,43
				CR66	127	17	CR66A	2,44	2,08	9,73
							CR67A	2,41	2,13	9,72
				CR67	155	18	CR67B	2,42	2,09	9,61
							CR68A	2,39	2,10	9,42
				CR69	81	37	CR69A	2,42	2,15	9,89
							CR69B	2,39	2,14	9,60
				CR70	135	55	CR70A	2,42	2,07	9,52
							CR70B	2,40	2,15	9,73
562321	4495606	CRML-18	Macieira de Alcoba	CR71	207	57	CR71A	2,42	2,13	9,80
							CR71B	2,44	2,11	9,87
				CR72	73	27	CR72A	2,42	2,09	9,61
							CR73A	2,44	2,07	9,68
				CR73	73	11	CR73B	2,44	2,22	10,38
							CR74A	2,42	2,10	9,66
				CR74	141	30	CR74B	2,41	2,22	10,13
							CR75A	2,40	2,09	9,45
				CR75	221	58	CR75B	2,42	2,27	10,44
							CR75C	2,44	2,09	9,77
							CR76A	2,40	2,16	9,77
567497	4487347	CRML-19	Almijofa	CR76	303	75	CR76B	2,46	2,09	9,93
							CR76C	2,45	2,09	9,85
				CR77	103	53	CR77A	2,44	2,20	10,29
							CR77B	2,45	2,11	9,95
				CR78	211	43	CR78A	2,46	2,09	9,93
							CR79A	2,41	2,11	9,63
				CR79	9	56	CR79B	2,43	2,11	9,79
							CR80A	2,42	2,11	9,71

Coord. UTM WGS84		Estação	Fácies	Amostra	Azim. (°)	Incl. (°)	Subamostra	Diâmetro (cm)	Altura (cm)	Volume (cm³)
X	Y									
570223	4491557	CRML-20	Paredes	CR81	321	37	CR81A	2,41	2,09	9,53
							CR81B	2,41	2,15	9,81
				CR82	281	25	CR82A	2,40	2,07	9,36
							CR82B	2,44	2,17	10,15
				CR83	57	32	CR83A	2,40	1,99	9,00
							CR83B	2,42	2,10	9,66
				CR84	137	84	CR84A	2,44	2,09	9,77
565378	4492992	CRML-21	Caramulo	CR85	205	40	CR85A	2,44	2,12	9,91
				CR86	185	42	CR86A	2,43	2,12	9,83
							CR86B	2,40	2,07	9,36
				CR87	77	51	CR87A	2,41	2,10	9,58
				CR88	57	57	CR88A	2,43	2,13	9,88
							CR88B	2,42	2,17	9,98
				CR89	305	61	CR89A	2,40	2,09	9,45
566130	4491884	CRML-22	Caramulo	CR90	253	33	CR90A	2,43	2,09	9,69
							CR90B	2,43	2,16	10,02
				CR91	348	14	CR91A	2,42	2,06	9,48
							CR91B	2,42	2,12	9,75
				CR92	49	50	CR92A	2,44	2,13	9,96
							CR92B	2,46	2,05	9,74
							CR92C	2,45	2,09	9,85
				CR93	27	24	CR93A	2,42	2,11	9,71
							CR93B	2,44	2,10	9,82
563831	4492891	CRML-23	Caramulo	CR94	81	27	CR94A	2,45	2,07	9,76
							CR94B	2,46	2,13	10,12
				CR95	31	10	CR95A	2,45	2,10	9,90
				CR96	331	18	CR96A	2,45	2,11	9,95
				CR97	67	37	CR97A	2,45	2,13	10,04
				CR98	250	77	CR98A	2,45	2,13	10,04
569500	4488238	CRML-24	Almijofa	CR99	63	55	CR99A	2,45	2,14	10,09
				CR100	107	47	CR100A	2,43	2,10	9,74
				CR101	299	60	CR101A	2,45	2,13	10,04
							CR101B	2,45	2,14	10,09
				CR102	245	43	CR102A	2,45	2,15	10,14
							CR102B	2,43	2,09	9,69
569543	4490598	CRML-25	Caramulo	CR103	337	6	CR103A	2,47	2,11	10,11
				CR104	3	51	CR104A	2,52	2,09	10,42
							CR104B	2,47	2,10	10,06
				CR105	297	23	CR105A	2,47	2,11	10,11
				CR106	31	33	CR106A	2,48	2,11	10,19
				CR107	97	61	CR107A	2,47	2,10	10,06
							CR107B	2,47	2,14	10,25
				CR108	357	19	CR108A	2,45	2,16	10,18
							CR108B	2,47	2,14	10,25
				CR109	65	5	CR109A	2,50	2,10	10,31
							CR109B	2,48	2,08	10,05
				CR110	43	50	CR110A	2,51	2,09	10,34
							CR110B	2,51	2,09	10,34
				CR111	265	65	CR111A	2,45	2,18	10,28
							CR111B	2,49	2,09	10,18
				CR112	185	42	CR112A	2,47	2,11	10,11
							CR112B	2,49	2,09	10,18

Coord. UTM WGS84		Estação	Fácies	Amostra	Azim. (°)	Incl. (°)	Subamostra	Diâmetro (cm)	Altura (cm)	Volume (cm³)
X	Y									
568360	4492967	CRML-27	Paredes	CR113	297	64	CR113A	2,45	2,13	10,04
							CR113B	2,42	2,09	9,61
				CR114	55	60	CR114A	2,45	2,11	9,95
							CR114B	2,47	2,12	10,16
							CR114C	2,45	2,13	10,04
				CR115	55	77	CR115A	2,46	2,10	9,98
							CR115B	2,44	2,19	10,24
				CR116	157	68	CR116A	2,44	2,09	9,77
							CR116B	2,40	2,11	9,55
				CR117	241	32	CR117A	2,42	2,12	9,75